

Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр  
Российской академии наук»

# **ТРУДЫ**

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

№ 9, 2019

Серия ЛИМНОЛОГИЯ И ОКЕАНОЛОГИЯ

Петрозаводск  
2019

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

Редакционный совет

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

Редакционная коллегия серии «ЛИМНОЛОГИЯ И ОКЕАНОЛОГИЯ»

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

*Издается с января 2009 г.*

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

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

Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences

# **TRANSACTIONS**

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

No. 9, 2019

LIMNOLOGY AND OCEANOLOGY Series

Petrozavodsk  
2019

Editor-in-Chief

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

Editorial Council

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

Editorial Board of the LIMNOLOGY AND OCEANOLOGY Series

N. L. BOLOTOVA, DSc (Biol.), Prof.; A. P. FEDOTOV, DSc (Geol.-Miner.); N. N. FILATOV (Editor-in-Charge), RAS Corr. Fellow, DSc (Geog.), Prof.; G. T. FRUMIN, DSc (Chem.); N. V. IL'MAST, DSc (Biol.); S. D. GOLOSOV, PhD (Phys.-Math.); S. F. KOMULAINEN, DSc. (Biol.); A. V. KURAEV, PhD (Geog.); E. A. KURASHOV, DSc (Biol.); M. LEPPYARANTA, PhD; L. E. NAZAROVA (Deputy Editor-in-Charge), PhD (Geog.); 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 551.46/49:51

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МЕЛКОВОДНОМ БОРЕАЛЬНОМ ОЗЕРЕ: ВЕРИФИКАЦИЯ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ

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

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

Расчеты на трехмерной термогидродинамической модели были верифицированы на основе сравнения модельных данных с результатами наблюдений, проводившихся вдоль трех разрезов в оз. Вендюрском несколько раз в подледный период. Оценки показали, что: 1) модель переоценивает толщину сезонного льда, но при этом модельный лед устанавливается и разрушается в сроки, очень близкие к наблюдаемым; 2) модель в целом недооценивает температуру воды на 8–10 %; 3) сравнение модельных течений с данными измерений средних течений в отдельных точках озера показало качественное соответствие направления (совпадение по квадранту) и модуля скорости (совпадение по порядку величины и медленное убывание скорости со временем в течение зимнего сезона) модельных и наблюдаемых течений в подледный период зимы 1994–1995 гг. Недооценка температуры воды может оказывать влияние и на качество воспроизведения моделью химико-биологических процессов. Так, например, следует ожидать завышенные значения абсолютного содержания растворенного кислорода в основной части столба воды. Завышенные значения модельной температуры воды в придонных слоях локальных углублений могут повлиять на скорость других химико-биологических процессов, происходящих там. Несмотря на ошибки модельных расчетов, выявленные в ходе верификации, модель достаточно реалистично воспроизводит термогидродинамические процессы в мелководном озере в подледный период, что позволяет рассматривать ее как рабочий инструмент в дальнейших исследованиях, но требующий усовершенствования и дополнения программного кода для устранения выявленных недостатков. В качестве вариантов усовершенствования компьютерного кода авторы видят дальнейшее развитие модуля расчета потоков тепла и соли из донных отложений, разработку параметризаций, обеспечивающих перенос тепла вдоль водного столба на подсеточном уровне.

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

**I. S. Zverev, R. E. Zdorovenov, G. E. Zdorovenova, S. R. Bogdanov, S. Yu. Volkov, G. G. Gavrilenko, T. V. Efremova, N. I. Palshin, S. D. Golosov, A. Yu. Terzhevik. MODELING THE THERMO-HYDRODYNAMICS OF A SHALLOW BOREAL LAKE: 3D MODEL VERIFICATION**

3D modelled results were verified against observed data obtained along three transects in a shallow boreal lake Vendyurskoe several times during the ice season. It was revealed that 1) the model overestimates ice thickness; at the same time, modelled ice-on and ice-off dates are very close to those observed; 2) in general, the model underestimates the water temperature by 8–10 %; 3) comparison of modelled currents with observed data on mean currents revealed qualitative compliance of current direction (coincidence of quadrants) and modulus of velocity (coincidence of the order of magnitude and a slow decrease of velocity over time during the ice season 1994–1995). Underestimated water temperature may affect the quality of simulation of chemical-biological processes. For instance, one may expect overstated absolute values of dissolved oxygen content in the bulk of the water column. Overestimated modelled water temperature for layers near the bottom of local cavities may influence the rates of the chemical-biological processes occurring there. Despite the model errors found in the course of verification, the model quite realistically describes the hydrodynamic processes in a shallow ice-covered lake, and can therefore be regarded as a useful tool for further research after the diagnosed defects are removed from the computer code. As an option of the code improvement, the authors consider further elaboration of the module of heat/salt flux to/from bottom sediment, development of parameterisations facilitating heat transfer along the water column on sub-grid scale.

**Key words:** boreal lake; ice season; 3D model; currents; water temperature.

## **Введение**

Долгие годы в лимнологии преобладала парадигма одномерного – в предположении относительной однородности по горизонтали гидрофизических и химико-биологических характеристик – подхода в исследованиях. Следствием этого стало доминирование сбора данных в одной, редко – в нескольких точках исследуемого водоема и использования одномерных моделей в численных расчетах. Работы последних 20 лет показали, что в малых мелководных озерах могут существовать горизонтальные неоднородности в распределении термогидродинамических (ТГД) параметров, создающие предпосылки к адвективному переносу как гидрофизических, так и химико-биологических свойств водной среды. Опыт трехмерного моделирования гидродинамических процессов в мелководных водоемах весьма невелик и относится в основном ко второй половине предыдущего столетия [см., например, Falconer et al., 1991]. Современные 3D-модели позволяют воспроизводить термогидродинамику водоемов с весьма сложной батиметрией, учитывать влияние различных факторов, в том числе водной растительности, на скорости потоков и интенсивность вертикального перемешивания [Fenocchi, Sibilla, 2016; Torma, Wu, 2019].

В рамках исследований по государственной теме «Роль гидрофизических процессов в эко-

системах мелководных озер. Процессы переноса и перемешивания в годовом цикле» одним из направлений работы является численное моделирование термогидродинамических процессов в оз. Вендюрское с использованием трехмерной модели. Верификации этой модели и сравнению полученных результатов расчетов с данными натурных наблюдений и посвящена настоящая работа.

## **Объект и методы исследований**

Объектом численного моделирования было выбрано озеро Вендюрское, расположенное в южной Карелии (62°10' – 62°20' с. ш., 33°10' – 33°20' в. д.). Длина котловины озера – около 7 км, максимальная ширина 1,5–2 км, средняя и максимальная глубины составляют 5,3 и 13,4 м соответственно. Прозрачность воды – около 3 м. Более подробную информацию об озере можно найти в [Здорovenнова и др., 2017]. Озеро Вендюрское по прозрачности и морфометрическим особенностям, определяющим режим его перемешивания, является типичным представителем класса мелководных полимиктических водоемов бореальной зоны, широко распространенных на территории Карелии [Терзhevik и др., 2010].

Для выполнения расчетов была выбрана трехмерная модель гидродинамики внутреннего моря, разработанная в Институте вычи-

слительной математики РАН [Ибраев, 2008]. В последние годы модель была адаптирована к озерным условиям и хорошо зарекомендовала себя в расчетах ТГД-процессов в Ладожском и Онежском озерах [Зверев и др., 2017], чем и обусловлен выбор данной модели для выполнения расчетов в настоящей работе.

Циркуляция водной массы в озере произвольной геометрии описывается 3-мерными уравнениями термогидродинамики. Поверхность раздела воздух-вода свободная, воспроизводятся пространственная изменчивость топографии поверхности водоема и изменчивость среднего уровня озера. Взаимодействие атмосферы и водоема описывается через потоки импульса, тепла и влаги. При возникновении условий, благоприятных для формирования льда, включается модель льда, описывающая ТГД-процессы во льду (изменение температуры, замерзание, таяние) и динамические процессы (движение, торошение льда и т. д.). При этом потоки свойств через границу атмосфера-вода заменяются на потоки через границы атмосфера-лед и лед-вода. В модели явным образом описываются потоки воды и ее свойств (минерализация, теплосодержание) через боковые границы (приток и сток рек, обмен через возможные промежуточные водотоки) и поверхность раздела воздух-вода (испарение, осадки). Поскольку минерализация пресной воды намного меньше морской, в модели используется уравнение состояния слабоминерализованной воды [Chen, Millero, 1986]. В случае моделирования областей с открытыми границами на них ставятся условия излучения.

Для верификации модели был выбран подледный период, в течение которого вся внешняя атмосферная нагрузка на озеро минимизирована, а механизмы, отвечающие за развитие ТГД-процессов в водной толще, поддаются модельному учету. Основным преимуществом этого периода является малая скорость происходящих процессов, что избавляет от необходимости тщательного осреднения как модельных данных, так и результатов наблюдений. Для верификационных расчетов была использована следующая конфигурация модели. Поскольку в мелководных бореальных озерах в подледный период в придонных слоях отмечается существенный рост минерализации воды и температуры (превышение по концентрации растворенных солей может достигать 4–5 раз по сравнению с вышележащей водной массой [например, Malm et al., 1997b]), а придонная температура воды там же может на 1–1,5 °С превышать температуру максимальной плотности пресной воды [Malm et al.,

1997a]), в программный код модели были добавлены модули расчета потока тепла и соли из донных отложений.

Расчеты выполнялись со следующими параметрами: шаг по горизонтали – 80 м, по вертикали – 1 м, шаг по времени – 30 сек. Начальные условия ставились для середины октября. Дело в том, что в октябре в озере практически полностью исчезает пространственная неоднородность ТГД-параметров, и для этого времени для всей расчетной области можно задать одинаковые начальные условия. В нашем случае для всей расчетной области задавалась температура воды 7 °С на 14 октября 1993 года. Начальное значение минерализации воды в озере для всей расчетной области составляло 0,012 г/л.

В качестве исходной метеорологической информации для расчетов ТГД-процессов в озере использовались данные реанализа NCEP/NCAR – совместного проекта Национальных центров предсказания окружающей среды (NCEP) и атмосферных исследований (NCAR), США [Kalnay et al., 1996]. Применялась традиционная процедура интерполяции данных из четырех ближайших к озеру узлов сетки реанализа, образующих квадрат. В расчетах теплообмен через границу раздела вода-дно выполнялся в соответствии с подходом, предложенным Голосовым и Крейманом [1992] и основанным на двухслойном автомодельном параметрическом представлении вертикального распределения температуры в донных отложениях. В рамках данного подхода модель способна рассчитывать круглогодичную эволюцию вертикального распределения температуры в донных отложениях и производить количественную оценку потоков тепла через поверхность дна без предварительного исследования теплопроводных свойств грунта, т. е. без оценки эффективного коэффициента теплопроводности в нем. Используемая в расчетах схема теплообмена через границу раздела вода-дно неоднократно успешно применялась для озерных условий [см., например, Кондратьев и др., 2010]. В нижнюю расчетную ячейку был введен искусственный источник поступления минеральных солей интенсивностью  $6 \cdot 10^{-8}$  мг·л<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup>. Настройка параметров модели – альbedo воды и льда, коэффициенты экстинкции воды и льда – выполнялась по данным, описанным в [Петров и др., 2005; Kirillin et al., 2012; Zdorovenkova et al., 2013]. Расчеты начались с 14 октября 1993 года и заканчивались концом 1996 года. Результаты расчетов для первого года во внимание не принимались – этот год считался «разгонным» (spin-up).

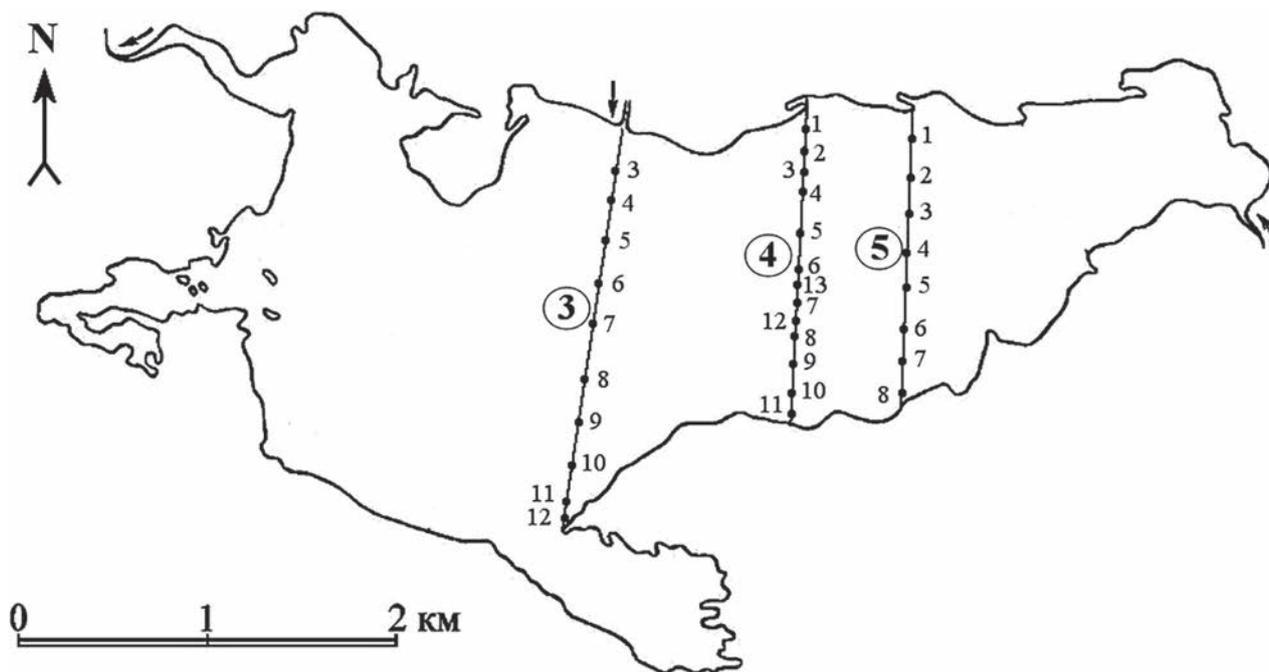


Рис. 1. Схема расположения станций наблюдений в оз. Вендюрском зимой 1994–1995 гг.  
 Fig. 1. Location of the observational stations in Lake Vendyurskoe during winter 1994–1995

В 1994–1995 и 1995–1996 гг. в озере в подледный период проводились наблюдения за температурой и электропроводностью воды в виде вертикальных зондирований на каждой станции на разрезах, показанных на рис. 1. Характеристики приборов, использовавшихся для измерений, приведены в работе [Malm et al., 1996]. Данные этих съемок на разрезах 3–5 были использованы для оценки качества модельных расчетов температуры воды. Во всех случаях, когда станция разреза не совпала с сеточным узлом, для сравнения выбирался узел с глубиной, максимально близкой к глубине станции.

Сравнение модельных и измеренных данных выполнялось с использованием двух критериев, приведенных в [Wang et al., 2010]: среднего отклонения смещения (Mean Bias Deviation, MBD)

$$MBD = 100 \times \frac{\frac{1}{N} \sum_{(i=1)}^N (x_i - y_i)}{\frac{1}{N} \sum_{(i=1)}^N y_i} \quad (1)$$

и среднеквадратичного отклонения (Root Mean Square Deviation, RMSD)

$$RMSD = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где  $N$  – число пар модельных и наблюдаемых параметров, использованных в расчете;  $x_i$  и  $y_i$  –

значения модельных и наблюдаемых параметров соответственно. Первый критерий можно рассматривать как меру интегральной относительной ошибки модели, второй – как меру интегральной абсолютной ошибки. Кроме того, для каждой пары и для рассчитанной средней по столбу температуры воды было получено значение  $(y_i - x_i)/y_i$  для оценки вклада относительного отклонения модельной температуры от наблюдаемой в данной точке в интегральную относительную ошибку модели.

Поскольку зимой 1995–1996 гг. специальные наблюдения за толщиной льда не проводились, для оценки толщины льда в момент съемок использовались записи значений температуры воды на станции, максимально близкой к соответствующему узлу модельной сетки, по которым можно было рассчитать толщину льда через показания прибора в лунке с точностью  $\pm 5$  см.

### Результаты расчетов и их сравнение с данными наблюдений

На рис. 2 показана временная динамика толщины ледяного покрова в течение зимы 1994–1995 гг. в различных точках вдоль 4-го разреза согласно результатам модельных расчетов и оценкам фактической толщины. 100%-е покрытие озера льдом по модельным данным наблюдалось с 10 ноября 1994 г. до 19 мая 1995 г. (в модели покрытие акватории льдом

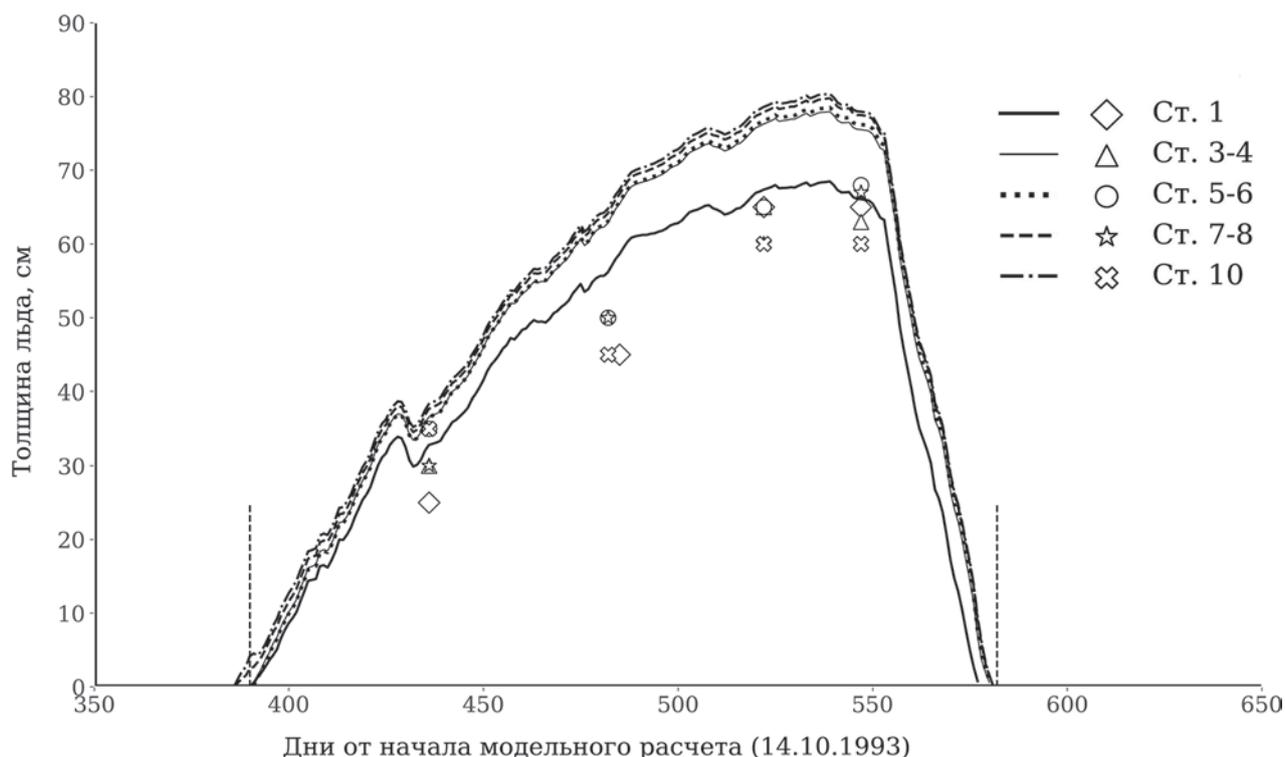


Рис. 2. Динамика ледяного покрова в ходе зимы 1994–1995 гг. в различных точках вдоль 4-го разреза по результатам модельных расчетов и оценок фактической толщины. Номер дня – от начала расчетов (14 октября 1993 г.). Линии – модельные данные, соответствующие станциям 4-го разреза, маркеры – натурные измерения. Вертикальные прерывистые линии – даты установления и исчезновения льда (по данным термокосы)

Fig. 2. The ice cover dynamics during winter 1994–1995 at various locations along the 4<sup>th</sup> cross-section based on model calculations and actual thickness values. Day number is counted from the start of model calculations (October 14, 1993). Graph lines present obtained model data corresponding to 4<sup>th</sup> section stations. Ice thicknesses derived from field measurements are indicated with markers. Vertical dashed lines indicate the ice-on and ice-off dates (based on TR-chain data)

и разрушение льда занимает 3–4 дня). Согласно оценкам, полученным по данным термокосы, установленной в районе ст. 6, лед установился 7–8 ноября и разрушился 19–20 мая (дни 390/391 и 582/583 в терминах продолжительности расчета).

Из рисунка следует, что в течение всей зимы модельный лед толще, чем фактический, в том числе и в прибрежной зоне (ст. 1), где модельные значения меньше таковых в открытой части озера (с разницей до 10 см).

На рис. 3 показано распределение измеренной и модельной на даты съемок (23 декабря 1994 г., 19 марта и 13 апреля 1995 г.) температуры воды на разрезах 3 и 4.

Как видно из рис. 3, все модельные изотермы, начиная с температуры воды выше 1 °С, расположены глубже фактических. Исключение составляют только придонные горизонты, где модельные и измеренные значения близки.

В таблице приведены расчеты среднего отклонения смещения (СОС) и среднеквадратичного отклонения (СКО) результатов расчета

температуры воды от ее измеренных значений, которые могут быть использованы как мера качества модельных результатов. Данные оценки носят интегральный характер и позволяют судить о тенденциях. Так, СОС показывает, что модель устойчиво недооценивает температуру воды (исключение составляет один случай – мартовская съемка на 5-м разрезе) на 8–10 %. СКО, являющееся в данном случае абсолютной мерой ошибки модели, составило 0,17–0,28 °С в зависимости от разреза и съемки, со средним значением 0,25 °С. Самые высокие значения СКО показали оценки для мартовской и апрельской съемок.

На рис. 4 показано распределение относительной невязки температуры воды вдоль разрезов 3, 4 и 5 по отношению к измеренным в ходе съемок значениям. В декабре модель занижает значения температуры воды практически везде, за исключением придонных слоев в локальных углублениях, где температура воды выше наблюдаемой. В марте участки с «перегретой» водой в углублениях расширя-

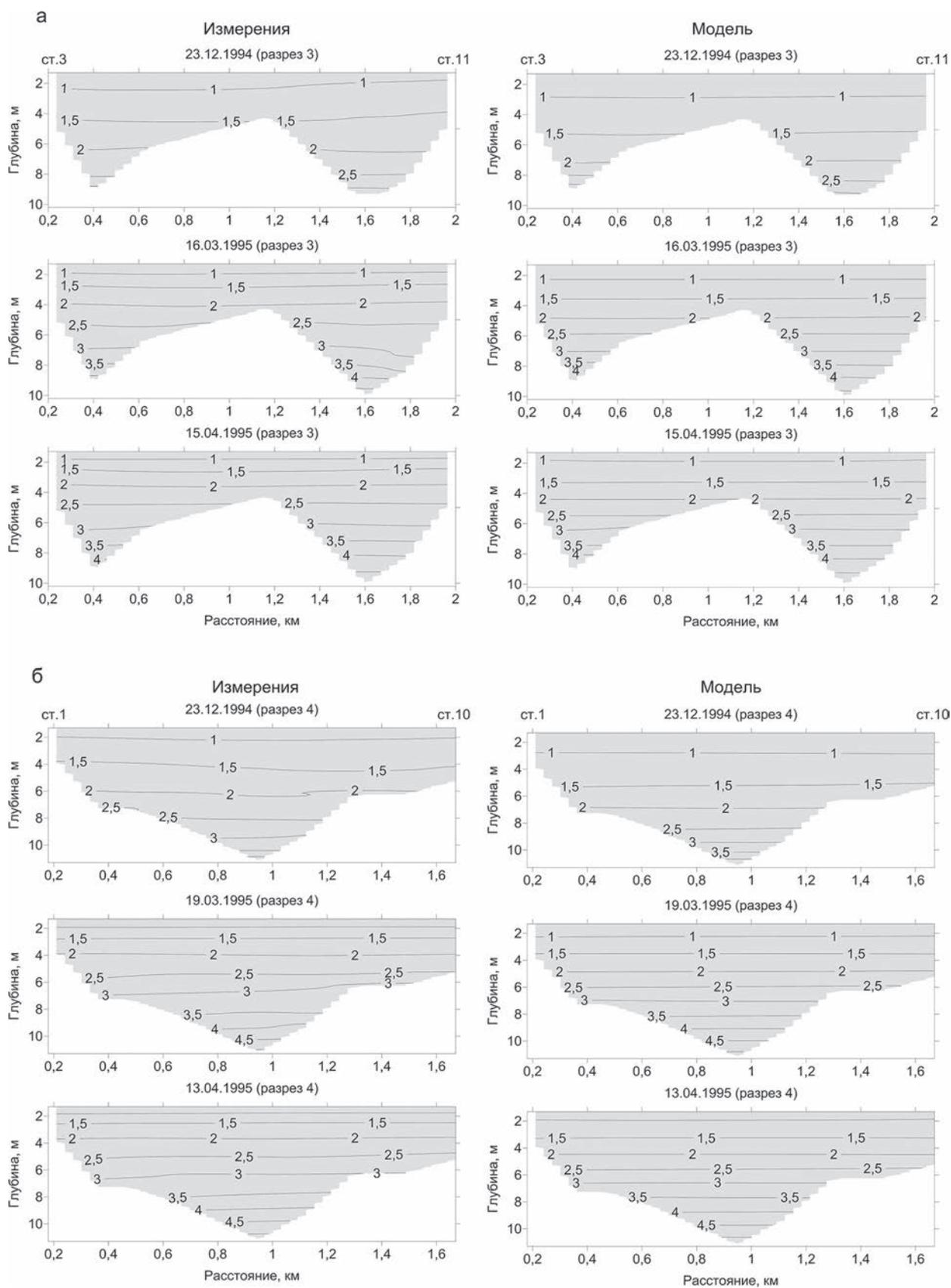


Рис. 3. Распределение измеренной и модельной температуры воды вдоль 3-го и 4-го разрезов зимой 1994–1995 гг.

Fig. 3. The distribution of measured and modelled water temperature along the 3<sup>rd</sup> and 4<sup>th</sup> cross-sections in winter 1994–1995

Среднее отклонение смещения, СОС (MBD), и среднеквадратичное отклонение, СКО (RMSD), рассчитанные по модельным данным и данным наблюдений на разрезах 3–5 в подледный период 1994–1995 гг.

Mean Bias Deviation (MBD) and Root Mean Square Deviation (RMSD), estimated on the basis of modelled and observational data on 3–5 cross-sections during the ice season of 1994–1995

Разрез Section	Съемка Survey	СОС, % MBD, %	СКО, °C RMSD, °C
	23 декабря 1994 г. December 23, 1994		
3	(N = 55)	-9,48	0,17
4	(N = 67)	-11,49	0,23
5	(N = 18*)	-5,23	0,18
	7 февраля 1995 г. February 7, 1995		
3	(N = ?)	-	-
4	(N = 42)	-8,96	0,27
5	(N = ?)	-	-
	19 марта 1995 г. March 19, 1995		
3	(N = 57)	-8,44	0,25
4	(N = 57)	-8,24	0,24
5	(N = 45)	10,31	0,26
	13 апреля 1995 г. April 13, 1995		
3	(N = 56)	-7,30	0,27
4	(N = 56)	-6,21	0,26
5	(N = 45)	-7,35	0,28
	Сезон (все съемки) Season (all surveys)		
3	(N = 168)	-8,28	0,24
4	(N = 247)	-8,53	0,25
5	(N = 108)	-9,29	0,26
	Сезон по всем разрезам и съемкам All sections and all surveys (T = 523)	-8,60	0,25**

*Примечание.* N – число горизонтов наблюдений; \*неполный разрез, \*\*составляет около 10 % от среднего значения по данной выборке.

*Note.* N is the number of measurement depths; \*incomplete cross-section, \*\*is about 10 % of the mean for sampled data.

ются как по вертикали, так и по горизонтали; в верхнем слое с глубинами 1–2 м аналогичные участки также появляются в прибрежных зонах. В апреле поверхностный перегретый слой распространяется уже по всему разрезу.

На рис. 5 показано распределение относительной ошибки модельного значения средней по столбу температуры воды по разрезам (зима 1994–1995 гг.). Как и в предыдущем случае, расчеты показали устойчивую недооценку температуры моделью в пределах интегральной абсолютной ошибки (см. таблицу). Следует отметить, что максимальные значения относительной ошибки приурочены к мелководным станциям.

### Обсуждение результатов

Основной проблемой численных моделей, описывающих сезонную динамику замерзающих водоемов в режиме офф-лайн (без ин-

терактивного взаимодействия с моделью погоды), является их неспособность описывать динамику снежного покрова на поверхности льда. Поскольку скорость нарастания льда является функцией температуры его поверхности, при отсутствии снега, изолирующего лед от прямого воздействия низких температур воздуха, завышенные значения толщины «модельного» льда – вполне ожидаемый результат.

Основным механизмом, формирующим течения в подледный период, является горизонтальная неоднородность поля плотности/давления [Malm et al., 1998; Петров и др., 2007]. Если средняя температура по столбу ( $T_{\text{mean}}$ ) воспроизводится хорошо, мы можем ожидать, что подледные схемы течений геострофического характера в озере в целом должны быть близки к реальности. Недооценка  $T_{\text{mean}}$  в прибрежной зоне может привести к росту скорости, пропорциональному квадрату значения этой недооценки. Данное обстоятельство по-

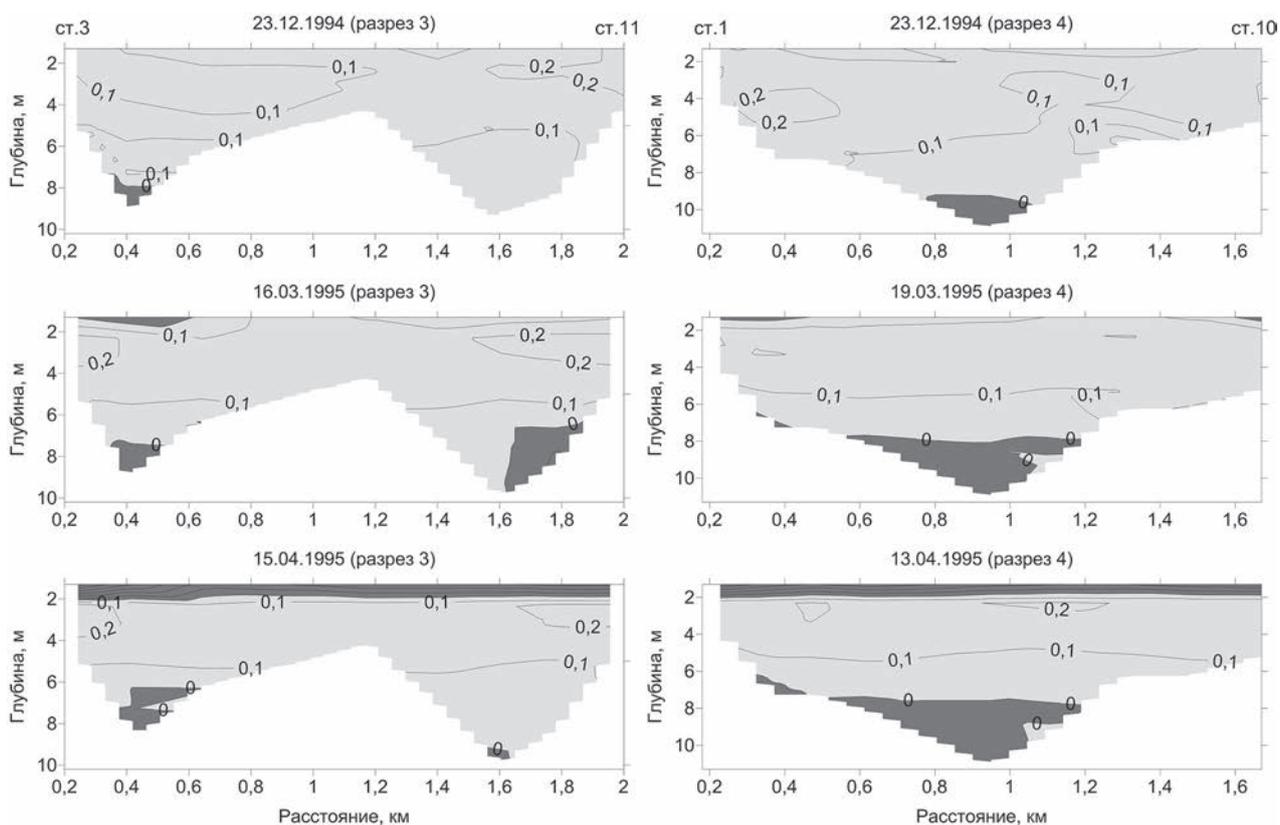


Рис. 4. Распределение относительной невязки модельной температуры воды вдоль разрезов 3, 4 и 5 по отношению к измеренным в ходе съемок 1994–1995 гг. значениям

Fig. 4. Relative residuals of modelled water temperature along cross-sections 3, 4, 5 with regard to measured values in 1994–1995

звояет предположить, что ошибка в расчете температуры воды, не превышающая 20–25 %, потенциально увеличивает скорость приблизительно на 5–6 % и является допустимой для подледного периода. «Переоценка» суточного переноса в этом случае составит около 5 м на каждый мм/с.

Недооценка температуры воды может оказывать влияние и на качество воспроизведения моделью химико-биологических процессов. Так, например, следует ожидать завышенные значения абсолютного содержания растворенного кислорода в основной части столба воды, поскольку при занижении расчетной температуры скорость потребления кислорода в воде будет уменьшаться. Завышенные значения модельной температуры воды в придонных слоях локальных углублений могут повлиять на скорость других химико-биологических процессов, происходящих там.

Несмотря на наличие данных наблюдений за течениями в озере, их систематическое сравнение с результатами расчетов не проводилось, поскольку эти измерения выполнялись в каждом случае в одной точке на конкретном

горизонте и поэтому такое сравнение представляется авторам нерепрезентативным для оценки качества моделируемой циркуляции водной массы озера. Сравнение модельных течений с данными измерений средних течений в отдельных точках озера (см. рис. 9 в работе [Malm et al., 1998], показало качественное соответствие направления (совпадение по квадранту) и модуля скорости (совпадение по порядку величины и медленное убывание скорости со временем в течение зимнего сезона) модельных и наблюдаемых течений в подледный период зимы 1994–1995 гг.

Модель в сегодняшней ее постановке не может воспроизвести механизмы перераспределения тепла/массы, не описанные в ней. К ним в том числе относится обрушение коротких внутренних волн, возникающих на фоне зимней стратификации. Это не значит, что улучшить работу модели невозможно. В качестве вариантов авторы видят усовершенствование модуля расчета потоков тепла и соли из донных отложений, разработку параметризаций, обеспечивающих перенос тепла вдоль водного столба на подсеточном уровне.

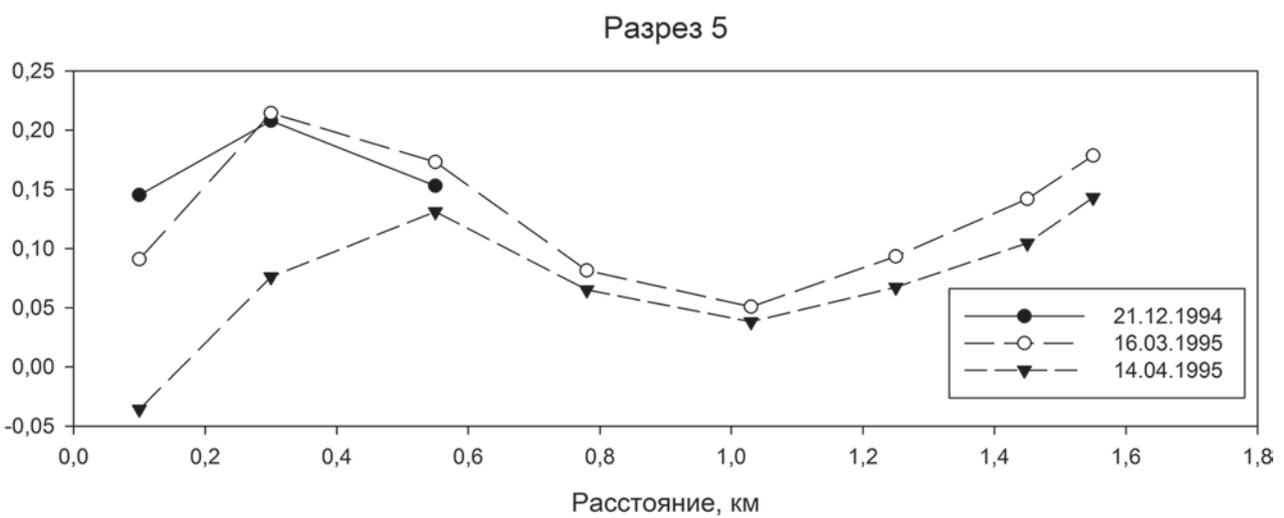
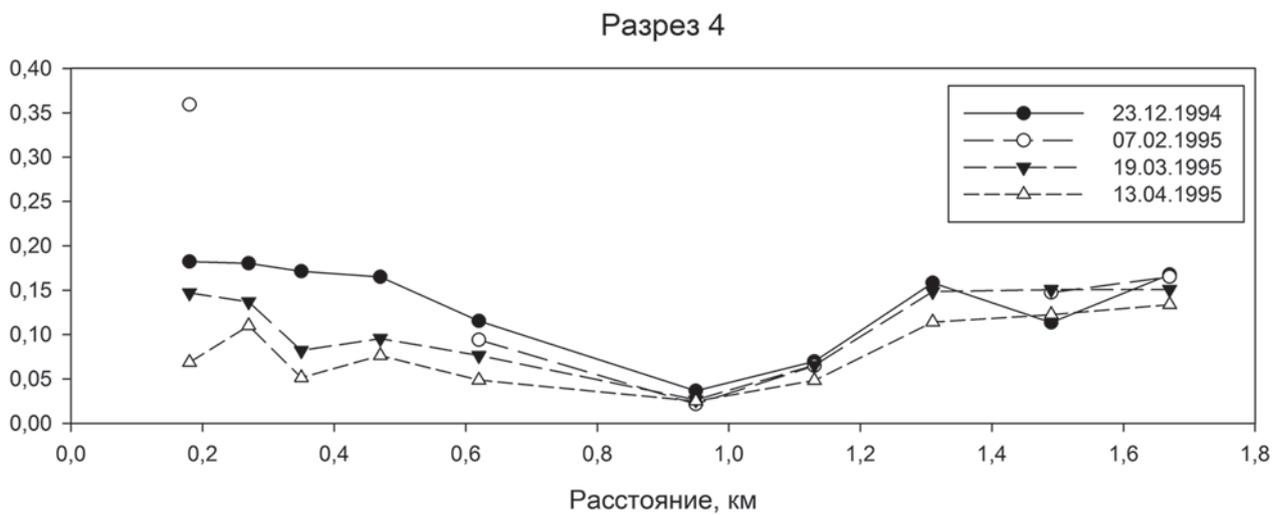
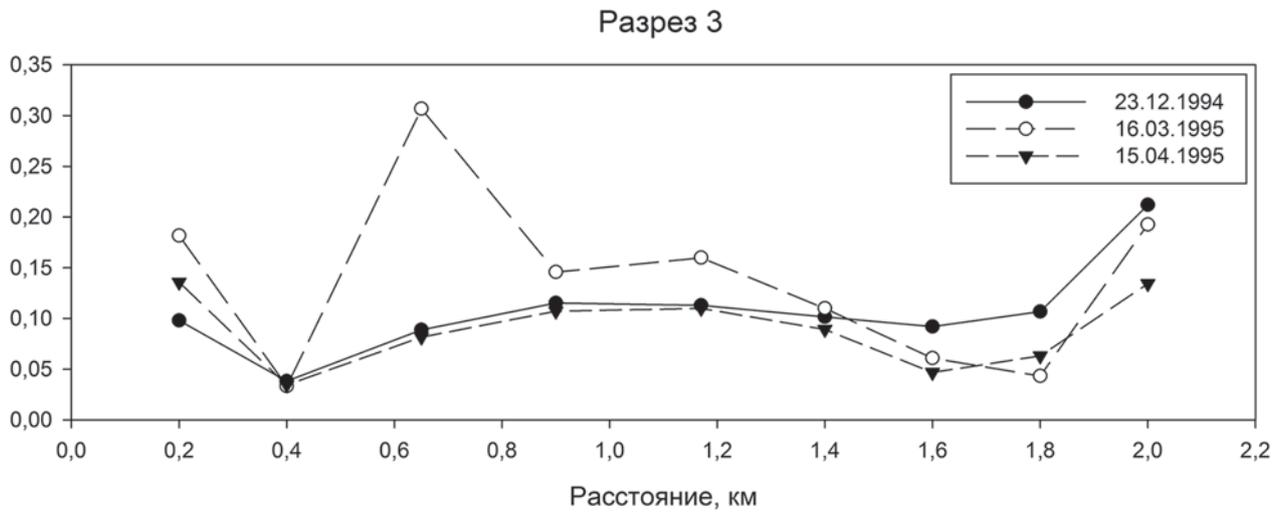


Рис. 5. Распределение относительной ошибки модельного значения средней по столбу температуры воды по разрезам (зима 1994–1995 гг.). Вертикальная ось – значения относительной ошибки, доли единицы  
 Fig. 5. Relative residuals of modelled mean water column temperature along cross-sections (winter 1994–1995). The vertical axis stands for relative residual values, unit fractions

## Заключение

Сравнение результатов модельных расчетов и данных наблюдений за температурой воды в мелководном бореальном озере Вендюрское позволяет сделать следующие выводы. Модель в целом дает заниженные – на 8–10 % – значения температуры воды в основной части водного столба. Влияние этих ошибок на поле плотности, определяющее формирование сезонных течений в озере, не является драматичным. Интегральные относительные и абсолютные ошибки модельных расчетов достаточно устойчивы во времени и пространстве, что говорит об их систематическом характере.

Несмотря на ошибки численных расчетов, выявленные в ходе верификации, модель достаточно реалистично воспроизводит ТГД-процессы в мелководном озере в подледный период (сезонная динамика поля температуры воды, характер течений), что позволяет рассматривать ее как рабочий инструмент в дальнейших исследованиях, но требующий усовершенствования и дополнения программного кода для устранения выявленных недостатков.

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

## Литература

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

Зверев И. С., Ушаков К. В., Шипунова Е. А., Голосов С. Д., Ибраев Р. А. Оценка влияния основных притоков Ладожского озера на формирование водной массы бухты Петрокрепость (исток р. Невы) по результатам математического моделирования // Озера Евразии: проблемы и пути решения: Материалы I Междунар. конф. (Петрозаводск, 11–15 сентября 2017 г.). Петрозаводск, 2017. С. 228–233.

Здоровеннова Г. Э., Гавриленко Г. Г., Здоровеннов Р. Э., Маммарелла И., Ояла А., Хейсканен Ю., Тержевик А. Ю. Эволюция температуры водной толщи бореальных озер на фоне изменений регионального климата // Известия РГО. 2017. Т. 149, вып. 6. С. 59–74.

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

Кондратьев С. А., Голосов С. Д., Зверев И. С., Рябченко В. А., Дворников А. Ю. Моделирование абиотических процессов в системе водосбор-водоем (на примере Чудско-Псковского озера). СПб.: Нестор-История, 2010. 104 с.

Петров М. П., Тержевик А. Ю., Пальшин Н. И., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э. Поглощение солнечной радиации снежно-ледовым покровом озер // Водные ресурсы. 2005. Т. 32, № 5. С. 546–554.

Петров М. П., Тержевик А. Ю., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э. Движения воды в мелководном озере, покрытом льдом // Водные ресурсы. 2007. Т. 34, № 2. С. 131–140.

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

Тержевик А. Ю., Голосов С. Д., Гавриленко Г. Г., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э., Волков С. Ю., Пальшин Н. И., Ефремова Т. В., Богданов С. Р. Возможное влияние «необычной» весны на режим растворенного кислорода в мелководном озере в летний период // Труды КарНЦ РАН. 2017. № 10. С. 17–27. doi: 10.17076/lim712

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

Falconer R. A., George D. G., Hall P. Three-dimensional numerical modelling of wind-driven circulation in a shallow homogeneous lake // J. Hydrol. 1991. Vol. 124. P. 59–79. doi: 10.1016/0022-1694(91)90006-4

Fenocchi A., Sibilla S. Hydrodynamic modelling and characterisation of a shallow fluvial lake: a study on the Superior Lake of Mantua // J. Limnol. 2016. Vol. 75(3). P. 455–471. doi: 10.4081/jlimnol.2016.1378

Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woolen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K. C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. Vol. 77. P. 437–470.

Kirillin G., Leppäranta M., Terzhevik A., Granin N., Bernhardt J., Engelhardt C., Efremova T., Golosov S., Palshin N., Sherstyankin P., Zdorovenнова G., Zdorovenнов R. Physics of seasonally ice-covered lakes: a review // Aquatic Sciences. 2012. Vol. 74. P. 659–682. doi: 10.1007/s00027-012-0279-y

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. A field study of thermo- and hydrodynamics in three small Karelian lakes during winter 1994/1995 / Department of Water Resources Engineering, Institute of Technology, University of Lund, Rep. 3197. Lund, 1996. 220 p.

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

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. Temperature and salt content regimes in three shallow ice-covered lakes: 2. Heat and mass fluxes // Nordic Hydrol. 1997b. Vol. 28. P. 129–152.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. A field study on currents

in a shallow ice-covered lake // *Limnol. Oceanogr.* 1998. Vol. 43. P. 1669–1679.

Tomra P., Wu C. H. Temperature and circulation dynamics in a smalland shallow lake: Effects of weak stratification and littoral submerged macrophytes // *Water*. 2019. 11(1). 128 p. doi: 10.3390/w11010128

Wang J., Hu H., Schwab D., Leshkevich G., Beletsky D., Hawley N., Clite A. Development of the Great Lakes Ice-circulation Model (GLIM): Application

to Lake Erie in 2003–2004 // *J. Great Lakes Res.* 2010. Vol. 36. P. 425–436. doi: 10.1016/j.jglr.2010.04.002

Zdorovenнова G., Zdorovenнов R., Palshin N., Terzhevik A. Optical properties of the ice cover on Vendyurskoe lake, Russian Karelia (1995–2012) // *Ann. Glaciol.* 2013. Vol. 54(62). P. 121–124.

Поступила в редакцию 08.07.2019

## References

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.

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

Kondrat'ev S. A., Golosov S. D., Zverev I. S., Ryabchenko V. A., Dvornikov A. Yu. Modelirovanie abioticheskikh protsessov v sisteme vodosbor-vodoem (na primere Chudsko-Pskovskogo ozera) [Modelling of abiotic processes in the catchment-reservoir system (case of Lake Peipus)]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2010. 104 p.

Petrov M. P., Terzhevik A. Yu., Pal'shin N. I., Zdorovennov R. E., Zdorovenнова G. E. Absorption of solar radiation by snow-and-ice cover of lakes. *Water Res.* 2005. Vol. 32, no. 5. P. 496–504.

Petrov M. P., Terzhevik A. Yu., Zdorovennov R. E., Zdorovenнова G. E. Motion of water in an ice-covered shallow lake. *Water Res.* 2007. Vol. 34, no. 2. P. 113–122.

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. Hydrophysical aspects of oxygen regime formation in a shallow ice-covered lake. *Water Res.* 2010. Vol. 37, no. 5. P. 662–673.

Terzhevik A. Yu., Golosov S. D., Gavrilenko G. G., Zdorovennov R. E., Zdorovenнова G. E., Volkov S. Yu., Pal'shin N. I., Efremova T. V., Bogdanov S. R. Vozmozhnoe vliyaniye "neobychnoi" vesny na rezhim rastvorenogo kisloroda v melkovodnom ozere v letnii period [The possible effect of unusual spring on the dissolved oxygen in a shallow lake during summer]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2017. No. 10. P. 17–27. doi: 10.17076/lim712

Zverev I. S., Ushakov K. V., Shipunova E. A., Golosov S. D., Ibraev R. A. Otsenka vliyaniya osnovnykh pritokov Ladozhskogo ozera na formirovanie vodnoi massy bukhty Petrokrepost' (istok r. Nevy) po rezul'tatam matematicheskogo modelirovaniya [Effect of the main confluent of Lake Ladoga on the formation of water mass of the Petrokrepost Bay – the effluent of the Neva river (upon the results of mathematical modelling)]. *Ozera Evrazii: problemy i puti resheniya: Mat. I Mezhdunar. konf. (Petrozavodsk, 11–15 sent. 2017 g.)* [Lakes of Eurasia: Problems and solutions: Proceed. 1<sup>st</sup> int. conf. (Petrozavodsk, Sept. 11–15, 2017)]. Petrozavodsk, 2017. P. 228–233.

Zdorovenнова G. E., Gavrilenko G. G., Zdorovennov R. E., Mammarella I., Ojala A., Heiskanen J., Terzhevik A. 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]. *Izvestiya RGO* [The Russ. Geographical Society Herald]. 2017. Vol. 149, no. 6. P. 59–74.

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

Falconer R. A., George D. G., Hall P. Three-dimensional numerical modelling of wind-driven circulation in a shallow homogeneous lake. *J. Hydrol.* 1991. Vol. 124. P. 59–79. doi: 10.1016/0022-1694(91)90006-4

Fenocchi A., Sibilla S. Hydrodynamic modelling and characterisation of a shallow fluvial lake: a study on the Superior Lake of Mantua. *J. Limnol.* 2016. Vol. 75(3). P. 455–471. doi: 10.4081/jlimnol.2016.1378

Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woolen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K. C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1996. Vol. 77. P. 437–470.

Kirillin G., Leppäranta M., Terzhevik A., Granin N., Bernhardt J., Engelhardt C., Efremova T., Golosov S., Palshin N., Sherstyankin P., Zdorovenнова G., Zdorovennov R. Physics of seasonally ice-covered lakes: a review. *Aquatic Sciences*. 2012. Vol. 74. P. 659–682. doi: 10.1007/s00027-012-0279-y

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. A field study of thermo- and hydrodynamics in three small Karelian lakes during winter 1994/1995. Department of Water Resources Engineering, Institute of Technology, University of Lund, Rep. 3197. Lund, 1996. 220 p.

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

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. Temperature and salt content regimes in three shallow ice-covered lakes: 2. Heat and mass fluxes. *Nordic Hydrol.* 1997b. Vol. 28. P. 129–152.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. A field study on currents in a shallow ice-covered lake. *Limnol. Oceanogr.* 1998. Vol. 43. P. 1669–1679.

*Torma P., Wu C. H.* Temperature and circulation dynamics in a smallland shallow lake: Effects of weak stratification and littoral submerged macrophytes. *Water*. 2019. 11(1). 128 p. doi: 10.3390/w11010128

*Wang J., Hu H., Schwab D., Leshkevich G., Beletsky D., Hawley N., Clite A.* Development of the Great Lakes Ice-circulation Model (GLIM): Application to Lake Erie in 2003–2004. *J. Great Lakes Res.*

2010. Vol. 36. P. 425–436. doi: 10.1016/j.jglr.2010.04.002

*Zdorovennova G., Zdorovennov R., Palshin N., Terzhevik A.* Optical properties of the ice cover on Vendyurskoe lake, Russian Karelia (1995–2012). *Ann. Glaciol.* 2013. Vol. 54(62). P. 121–124.

Received July 08, 2019

## 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

### **Здоровеннов Роман Эдуардович**

старший научный сотрудник лаборатории 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

### **Здоровеннова 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

### **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

### **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

### **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

## CONTRIBUTORS:

### **Zverev, Ilya**

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

### **Zdorovennov, Roman**

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

### **Zdorovennova, Galina**

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

### **Bogdanov, Sergey**

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

### **Volkov, Sergey**

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

### **Gavrilenko, Galina**

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

**Пальшин Николай Иннокентьевич**

старший научный сотрудник лаборатории 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

**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 лаборатории 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

**Efremova, Tatyana**

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

**Palshin, Nikolai**

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

**Golosov, Sergey**

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

УДК 536.252: 556.555.4

## ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ В ДИМИКТИЧЕСКИХ ОЗЕРАХ

Н. И. Пальшин<sup>1</sup>, С. Р. Богданов<sup>1</sup>, Т. В. Ефремова<sup>1</sup>, А. О. Кузина<sup>2</sup>

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

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

На основе данных многолетних измерений температуры воды в трех димиктических озерах получены оценки средних эффективных коэффициентов вертикального турбулентного обмена для периода формирования устойчивой термической стратификации (июль–август). В качестве объектов исследования выбраны глубокие озера: Онежское (Россия), Каллавеси (Финляндия), Инари (Финляндия). Для усредненных за многолетний период сезонных изменений температуры воды эффектами горизонтального переноса тепла обычно можно пренебречь и рассматривать дифференциальное уравнение теплопроводности для одномерного случая. Оценки эффективных коэффициентов теплопроводности были получены тремя способами: по изменениям теплосодержания столба воды, по локальным изменениям температуры воды и на основе анализа амплитудного и фазового отклика температуры глубоких слоев водной толщи на квазипериодические изменения средней температуры эпилимниона. Их значения, установленные в результате расчетов, на два-четыре порядка превышают значение коэффициента молекулярной теплопроводности в воде.

**Ключевые слова:** димиктическое озеро; термическая стратификация; коэффициент турбулентной диффузии; эффективный коэффициент теплопроводности.

### **N. I. Palshin, S. R. Bogdanov, T. V. Efremova, A. O. Kuzina. ESTIMATES OF THERMAL DIFFUSIVITY IN DIMICTIC LAKES**

Based on the results of long-term measurements of water temperature in three dimictic lakes, we obtained estimates of the average effective coefficients of vertical turbulent exchange for the period of formation of stable thermal stratification (July-August). Deep lakes were chosen as objects of this study: Onega (Russia), Kallavesi (Finland), Inari (Finland). For seasonal water temperature trends averaged over a multi-annual period the effects of horizontal heat transfer can be neglected, so the estimates were based on the analysis of the one-dimensional version of the heat transfer differential equation. The effective thermal diffusivity was calculated in three ways: based on changes in the heat content of the water column, local changes in water temperature, and also through the analysis of the amplitude and phase response of the deep layers temperature on quasi-periodic changes in the average temperature of the epilimnion. These estimates are two to four orders of magnitude greater than the value of the coefficient of molecular thermal diffusivity in water.

**Keywords:** dimictic lake; thermal stratification; coefficient of turbulent diffusion; effective coefficient of thermal diffusivity.

## Введение

Термические и гидродинамические процессы являются тем каркасом (базисом), формирование которого определяет протекание гидрохимических и гидробиологических процессов, важных для функционирования водных экосистем [Reynolds, 2006]. Они играют важнейшую роль в формировании термической структуры водоемов и перераспределении растворенных и взвешенных веществ. Особенно большое влияние они оказывают на разнообразие и продуктивность фитопланктона. В частности, турбулентное перемешивание и термическая стратификация являются абиотическими факторами для регулирования состава и численности весеннего и летнего фитопланктона [Yang et al., 2016]. Перемешивание улучшает насыщение кислородом гипolimниона, влияет на обмен биогенными элементами с донными отложениями, усиливает вертикальный перенос богатой питательными веществами воды из гипolimниона в эпилимнион и может даже вовлечь гипolimнетический фитопланктон обратно в фотическую зону. Движения воды определяют вертикальное распределение планктонных организмов в соответствии с их индивидуальными способностями всплывать или погружаться [Reynolds, 2006]. Сезонные вариации интенсивности перемешивания в вертикальном водном столбе могут дифференцированно влиять на конкурентные способности (между водорослями с разной плавучестью) и производительность таксонов фитопланктона с различными физиологическими особенностями [Peeters et al., 2013]. Уменьшение интенсивности турбулентного перемешивания с усилением плотностного расслоения водного столба и более истощенные условия питания в фотической зоне влияют на размер и структуру фитопланктона, что создает более предпочтительные условия для мелких таксонов [Winder, Sommer, 2012]. В результате отдельных натурных и лабораторных экспериментов установлена количественная связь между характеристиками турбулентности и фотосинтезом, а также выявлены разные режимы развития водорослей в зависимости от изменений гидродинамических условий [Thomas, Gibson, 1990; Крейман и др., 1992; Gibson, Thomas, 1995].

При количественном описании турбулентного перемешивания обычно используют диффузионное приближение, аппроксимируя турбулентные потоки тепла градиентными слагаемыми, включающими эффективные коэффициенты турбулентного обмена. При этом в численных моделях нередко применяется

искусственный подбор эффективных коэффициентов диффузии с целью получения наиболее реалистичных результатов расчетов. При классических оценках коэффициентов турбулентной теплопроводности обычно используются данные по динамике вертикальных распределений температуры воды [Хатчинсон, 1969; Хомскис, 1969]. Однако из-за присутствия случайных флуктуаций температуры воды в результате различных гидродинамических процессов (внутренние волны, апвеллинги, горизонтальный перенос тепла и др.) получить корректные оценки по единичным измерениям практически невозможно. В значительной мере уменьшить влияние случайных флуктуаций температуры воды для перехода к решению одномерной задачи можно лишь в результате усреднения большого количества данных. В фотическом слое также нельзя пренебрегать влиянием объемного нагревания воды солнечной радиацией и охлаждением воды, вызванным испарением и длинноволновым излучением.

В целом в современной трактовке задачу определения коэффициентов турбулентного обмена, в частности вертикального коэффициента турбулентной диффузии ( $K_v$ ), принято рассматривать в более широком контексте общих проблем стратифицированной турбулентности. При этом, соответственно, расчет  $K_v$  увязывается с задачами расчета других базовых параметров, в первую очередь – скорости диссипации кинетической энергии  $\varepsilon$ . Широкое распространение получила, например, формула Осборна  $K_v = \Gamma \varepsilon / N^2$ , где  $N$  – частота Брента – Вайсяля [Osborn, 1972, 1980]. При всей физической привлекательности такого подхода его имплементация связана со значительными трудностями. Например, открытым остается вопрос об оценке присутствующего в приведенной формуле коэффициента перемешивания  $\Gamma$ . Степень универсальности оценки  $\Gamma \sim 0,2$ , полученной из океанологических данных, остается спорным вопросом [Salehipour, Peltier, 2015; Mashayek et al., 2017]. В свою очередь, весьма непростой является и задача оценки  $\varepsilon$ . Для прямых ее оценок необходимы измерения скоростей течений автономными самописцами с высоким разрешением, однако такие приборы являются дорогостоящим оборудованием, их промышленные образцы стали появляться лишь в последние два десятилетия. Известные методы оценки  $\varepsilon$  на основе обработки температурных данных предполагают, например, использование процедуры трансформации полученных из эксперимента температурных профилей к соответствующим

монотонным изменениям (путем искусственной перестановки соответствующих слоев водной толщи – “reordering”), с последующей оценкой масштаба Торпа  $L_T$ . Конечные соотношения при этом достаточно просты и наглядны, однако также включают эмпирические параметры, оценка которых и постоянство их значений весьма проблематичны. В качестве примера можно привести формулу  $\varepsilon = 0,64L_T^2 N^3$  [Haren, 2019], основанную на использовании эмпирического соотношения  $L_O \approx 0,8L_T$ , связывающего значения масштабов Озмидова и Торпа.

Следует также отметить, что даже определенные значения величины  $K_V$  не решает полностью проблему расчета коэффициента турбулентной теплопроводности: вопрос о значении турбулентного параметра Прандтля  $Pr_t = K_V / K_T$  остается открытым. Открытым остается также вопрос о возможности экстраполяции океанологических оценок на случай водных масс озера. Гидродинамические процессы в озерах и океанах имеют много общего, но из-за огромных различий в размерах механизмы их перемешивания и формирования стратификации различаются. Наиболее детальный обзор гидродинамических процессов в водоемах суши, с использованием данных инструментальных измерений скоростей течений и температуры воды современными приборами, дан в статье [Wüest, Lorke, 2003], где наряду с механизмами перемешивания приведены диапазоны изменчивости гидрофизических параметров.

Цель исследования – по данным многолетних измерений температуры воды получить оценки эффективных коэффициентов теплопроводности, соответствующие наиболее типичным для июня–августа условиям атмосферного воздействия (по средним изменениям температуры воздуха, солнечной радиации, скорости ветра) на крупные димиктические водоемы.

## Материалы и методы

Исходными материалами для оценок коэффициентов теплопроводности послужили натурные данные многолетних измерений температуры воды на озерах: Онежском (площадь 9270 км<sup>2</sup>, средняя и максимальная глубины 30 и 120 м соответственно), Каллавети (890 км<sup>2</sup>, 9 и 70 м), Инари (1050 км<sup>2</sup>, 14 и 92 м). Относительно регулярные наблюдения за термическим режимом Онежского озера проводились в навигационные периоды с 1958 по 1989 г. Карельским республиканским центром по гидрометеорологии и мониторин-

гу окружающей среды на стандартных горизонтах (0,1; 2; 5; 10; 15; 20; 30; 50 м; дно) постоянных рейдовых вертикалей. Для анализа внутрисезонной изменчивости вертикальной термической структуры озера нами была выбрана станция с наличием ежемесячных наблюдений, расположенная в центральном глубоководном районе (61°46' с. ш.), для которой длины разгона ветра по основным направлениям (за исключением северного) превышают 30 км. По финским озерам Каллавети и Инари использованы ежедекадные многолетние наблюдения на горизонтах через 1–2 м за период с 1981 по 2001 г., собранные Эско Куусисто из режимных материалов для финских гидрологических ежегодников и любезно предоставленные нам в качестве обмена информацией. Озеро Каллавети имеет в плане сложную лопастную форму. В районе Куопио (62°55' с. ш.), где проводились наблюдения, прямое ветровое воздействие происходит на ограниченной акватории около 70 км<sup>2</sup> с максимальной глубиной 53 м, в точке наблюдения 46 м [Kuusisto, 1981]. В оз. Инари измерения температуры воды проводились в небольшом (площадь 10 км<sup>2</sup>) глубоком (максимальная глубина 52 м, в точке наблюдения 42 м) заливе (68°52' с. ш.), прикрытом островами от ветра на основной акватории озера [Kuusisto, 1981]. Во всех озерах измерения температуры воды проводились глубоководными опрокидывающимися термометрами, стандартное разрешение и точность приборов 0,02 °С.

Наиболее простые методы оценок коэффициентов теплопроводности основаны на использовании закона Фурье, который можно применять для случая глубоких озер при отсутствии в них горизонтального переноса и внутренних источников тепла. Один из них основан на непосредственном расчете теплового бюджета столба воды единичного сечения  $\Delta S$  и толщиной  $z^*$ . В рамках такого интегрального подхода скорость увеличения теплосодержания  $Q$  для выделенного столба, верхняя граница слоя которого расположена на некоторой поверхности выше дна водоема, можно аппроксимировать выражением:  $-\lambda \partial T / \partial z|_{z=H-z^*}$ , где  $\lambda$  – эффективная теплопроводность,  $\partial T / \partial z$  – вертикальный градиент температуры воды,  $H$  – глубина в озере. Ось  $z$  направлена сверху вниз,  $z = 0$  соответствует поверхности озера. В пределах допущенных ошибок измерений температуры воды потерями тепла на нагревание донных отложений можно пренебречь.

Для вычисления коэффициентов турбулентной теплопроводности  $K_T$  на разных горизонтах можно воспользоваться формулой

$$K_T = -\frac{1}{c_p \rho \Delta S} \frac{dQ_z}{dt} \frac{\partial z}{\partial T}, \quad (1)$$

где  $c_p$  и  $\rho$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении и плотность воды соответственно,  $dQ_z/dt$  – поток тепла через единичное сечение.

Расчеты количества тепла, проходящего через единичные площади поверхностей, и оценки  $K_T$  выполнялись по шагам снизу вверх (в соответствии с наращиванием толщины слоя) для всех горизонтов до нижней границы фотического слоя, на которых проводились измерения температуры воды в озерах. Оценка производных в правой части формулы (1) и, соответственно, надежность оценки коэффициента  $K_T$  существенно зависят от пространственной и временной дискретности измерений температуры.

В другом варианте описанного метода за основу принимается одномерное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_T \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (2)$$

и оценка  $K_T$  осуществляется по изменению температуры на заданном горизонте. При этом зависимостью  $K_T$  от  $z$ , как правило, пренебрегают, а для оценки второй производной температуры по вертикали используют выражение [Хатчинсон, 1969]:

$$T - C = C_1 e^{-az}, \quad (3)$$

обычно описывающее температурный профиль ниже эпилимниона в глубоких озерах с развитой термической стратификацией. Эмпирические константы  $C$  и  $C_1$  в выражении (3) характеризуют температуру придонных слоев:  $C$  – соответствующую изотермической циркуляции до установления термической стратификации и  $C_1$  – виртуальную температуру, которая соответствует экстраполяции температурной кривой гипolimниона и металимниона до поверхности озера. В этом методе ось  $z$  направлена вниз от поверхности озера ( $z = 0$ ). При наличии усредненных профилей температуры воды эмпирические параметры  $a$  (скорость изменения температуры воды с глубиной),  $C$  и  $C_1$  легко подбираются итерационным методом приближения. При их оценках значения температуры воды эпилимниона и придонного пограничного слоя удаляются из набора данных.

При использовании представления (3) уравнение (2) легко преобразуется в формулу

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K_T a^2 (T - C), \quad (4)$$

позволяющую произвести непосредственный расчет  $K_T$  для мета- и гипolimниона.

Менее известен еще один метод определения  $K_T$ , основанный на анализе решений базового уравнения (2), соответствующих задаче без начальных условий [Тихонов, Самарский, 1977]. В его рамках значение  $K_T$  определяется по отклику системы на установившиеся колебания температуры на ее поверхности. В простейшем случае, когда температура и плотность теплового потока зависят от времени в соответствии с гармоническим законом ( $T(0,t) = T_0 \sin(\omega t) + \bar{T}$ ), решение может быть представлено в аналитическом виде [Бабич и др., 1964]:

$$T(z,t) = T_0 \exp(-\sqrt{\omega/(2K_T)} z) \cos(\omega t - \sqrt{\omega/(2K_T)} z) + \bar{T}, \quad (5)$$

где  $T_0$  и  $\omega$  – амплитуда и частота колебаний температуры воды в поверхностном слое,  $\bar{T}$  – невозмущенное значение температуры.

Формула (5) отражает две характерные особенности передачи тепла в условиях периодического нагрева поверхности. Во-первых, на каждой заданной глубине температура изменяется со временем по гармоническому закону, однако при этом колебания в каждом слое сдвинуты по фазе на величину  $\sqrt{\omega/(2K_T)} z$  по отношению к колебаниям на поверхности. Временной масштаб  $z/\sqrt{2K_T\omega}$ , характеризующий подобную тепловую инерцию системы, определяется частотой колебаний, глубиной и эффективным коэффициентом теплопроводности. Что касается амплитуды колебаний, ее значение уменьшается с глубиной по экспоненциальному закону, при этом характерное значение «глубины проникновения»  $\tilde{z}$  определяется лишь параметрами  $K_T$  и  $\omega$ :  $\tilde{z} = \sqrt{2K_T/\omega}$ .

В целом рассматриваемое решение (5) уравнения (2) можно интерпретировать как затухающую с увеличением глубины температурную волну. Среднепогодные циклы солнечной радиации и температуры воздуха достаточно хорошо описываются гармоническими функциями, что дает основание при оценке эффективной теплопроводности водной толщи применить метод затухающей тепловой волны, ранее успешно использованный при изучении почв [Болотов, 2015]. При этом, конечно, следует иметь в виду, что процессы передачи тепла в глубину в почвах и водоемах суши существенно различаются. Если в твердых средах перенос тепла осуществляется на молекулярном уровне, то в воде он происходит главным образом в результате турбулентного перемешивания за счет сдвиговой и гравита-

ционной неустойчивости. Весеннее нагревание бореальных озер до температуры наибольшей плотности происходит в условиях гомотермии. В период осеннего охлаждения также формируется квазиоднородный по температуре слой воды, увеличивающийся со временем. Это оказывает влияние на изменения скоростей роста и понижения температуры в разных слоях воды и тем самым определяет характеристики синусоид, которые описывают годовой ход изменения температуры воды в озерах. К тому же снежно-ледовый покров в холодный период года существенно изменяет потоки тепла на поверхности водоемов, и гармоническими функциями можно описывать лишь только часть годового цикла. Изложенный метод широко используется также в теплотехнических измерениях; его, в частности, относят к одному из наиболее точных для определения коэффициентов теплопроводности материалов [Пономарев и др., 2006].

В димиктических озерах полугодовые циклы температуры воды на разных горизонтах достаточно хорошо представляются усеченными гармоническими функциями, с хорошо выраженными эффектами запаздывания и уменьшения амплитуды с увеличением глубины. В этой связи мы попытались выяснить возможность применения формулы (5) для оценки коэффициентов теплопроводности, используя многолетние данные измерений температуры воды в озерах на стандартных горизонтах с интервалом 5 м. Ось  $z$  направлена вниз, начиная от нижней границы фотического слоя ( $z = 0$ ). Расчеты проводились по разным слоям воды, соответствующим мета- и гипolimниону. Неизвестные параметры в формуле (5), в том числе коэффициенты теплопроводности, подбирались итерационным квази-ньютоновским методом нелинейного оценивания.

## Результаты

Оценка фоновых эффективных коэффициентов теплопроводности воды в озерах, которые бы соответствовали среднегодовым метеорологическим условиям с июня по август, осуществлялась тремя методами с использованием расчетных соотношений (1), (4) и (5).

Формула (1) позволяет оценивать коэффициенты теплопроводности по изменению теплосодержания столба воды, но при таких оценках необходимо учитывать только изменения температуры, обусловленные теплопроводностью воды, и исключить внутренние источники (солнечная радиация),

адвекцию тепла и флуктуации температуры, связанные с внутренними волнами. Теплом, затрачиваемым на нагревание грунта с молекулярной теплопроводностью, можно пренебречь, при этом в глубоких озерах амплитуды годовых колебаний температуры на границе вода-дно относительно малы. Для олиготрофного Онежского озера глубина прозрачности по диску Секки составляет 4–5 м. В соответствии с двойным значением глубины прозрачности толщина фотической зоны не превышает 10 м. Прозрачность озер обычно уменьшается с увеличением доли поверхностного питания [Пальшин и др., 2018]. Таким образом, в озерах Каллавеси и Инари толщина фотической зоны также не может превышать 10 м. Поглощением солнечной радиации во всех озерах глубже толщины фотической зоны можно пренебречь, т. к. ниже ее на толщину воды приходится меньше 1 % интегральной облученности.

С целью исключения случайных флуктуаций температуры воды все данные измерений за многолетние периоды наблюдений усреднялись отдельно по горизонтам. При сглаживании полугодовых циклов температуры воды на горизонтах использовались полиномы шестой степени. Усредненные профили температуры воды и рассчитанные с их помощью по формуле (1) эффективные коэффициенты теплопроводности для периодов развития термической стратификации в озерах приведены на рис. 1. Потоки тепла, проходящие через единичные горизонтальные сечения площадей на фиксированных горизонтах, вычислялись за промежутки времени  $dt$  по изменениям интегральных теплосодержаний столбов воды  $dQ_z$  от  $z$  до дна.

В соответствии с расчетами по формуле (1) максимальные значения эффективных коэффициентов теплопроводности  $> 3 \text{ см}^2/\text{с}$  были получены для самых ранних стадий летнего прогрева озер. На рис. 1 они не приведены, т. к. в этот период могут быть искажены наличием адвективного переноса тепла, поступающего с речным стоком (озера Инари, Каллавеси) или из мелководных районов, которые в Онежском озере весной прогреваются быстрее, чем глубоководные. С развитием термической стратификации и усилением гравитационной устойчивости водных масс во всех озерах коэффициенты теплопроводности уменьшались до  $0,1\text{--}0,5 \text{ см}^2/\text{с}$  (рис. 1, б, г, е). Таким образом, установлено, что диапазоны их изменчивости в озерах составляли  $0,1\text{--}10 \text{ см}^2/\text{с}$ , что в среднем на два-четыре порядка выше молекулярного значения ( $K_\mu \approx 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$ ). Наибольшие значения коэффициентов были

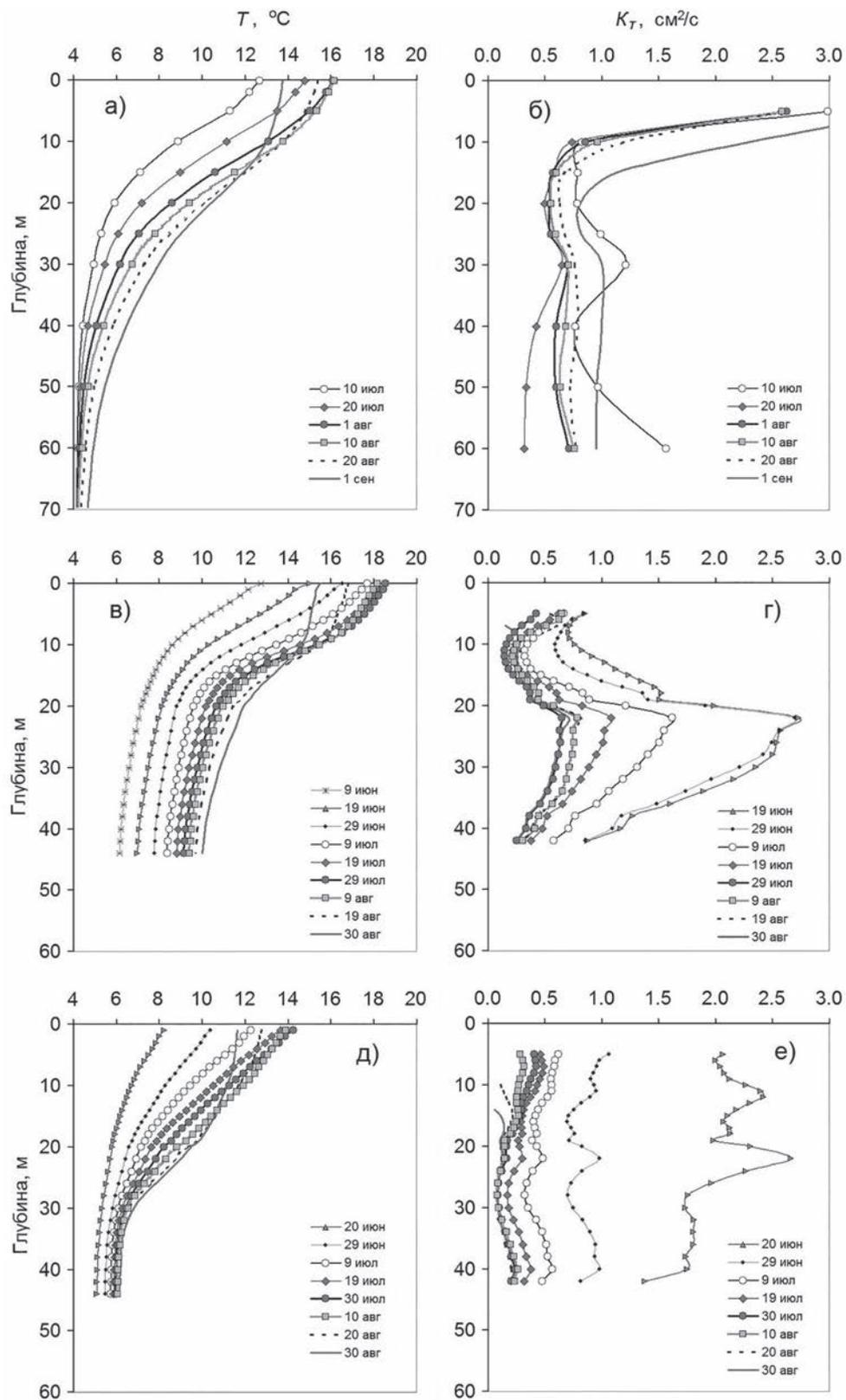


Рис. 1. Среднемноголетние профили температуры воды и рассчитанные по формуле (1) коэффициенты температуропроводности в период стратификации в озерах: Онежском (а, б), Каллавеси (в, г) и Инари (д, е)

Fig. 1. Mean multi-annual water temperature profiles and coefficients of thermal diffusivity calculated by formula (1) during the period of stratification in the lakes: Onego (a, b), Kallavesi (c, d) and Inari (e, f)

Средние коэффициенты температуропроводности, рассчитанные по формулам (5), (1), (4). Эмпирические параметры модели (5), полученные в результате аппроксимации натуральных данных (n – число измерений, R – коэффициенты корреляций)

Average thermal diffusivities calculated by formulas (5), (1), (4). The empirical parameters of model (5) obtained as a result of the field data approximation (n is the number of measurements, R is the correlation coefficients)

Метод Method	Формула (5) Formula (5)							(1)	(4)
Слой, м Depth, m	n	R	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\bar{T}, ^\circ\text{C}$	$D_{\text{max}}, \text{сут.}$	$\bar{K}_T, \text{см}^2/\text{с}$	$\bar{K}_T/K_\mu$	$\bar{K}_T, \text{см}^2/\text{с}$	$\bar{K}_T, \text{см}^2/\text{с}$
Онежское оз. (период: 20.06–20.10) Onego								20.06–10.09	25.06–10.09
10–25	905	0,80	17,0	–3,5	234	3,5	2500	2,1	1,2
30–50	484	0,68	9,3	1,4	248	5,0	3600	2,0	3,4
10–50	1389	0,83	12,4	0,3	239	3,2	2300	2,1	2,4
оз. Каллавеси (период: 20.05–20.10) Kallavesi								21.05–31.08	15.06–31.08
10–25	1075	0,81	11,2	3,8	226	1,5	1100	1,9	0,5
30–40	367	0,63	5,8	6,2	241	12,2	8700	1,9	5,0
10–40	1442	0,78	9,5	4,7	228	3,1	2200	1,9	2,3
оз. Инари (период: 05.06–20.10) Inari								10.06–31.08	20.06–31.08
10–25	1002	0,84	10,5	1,0	228	1,8	1300	1,4	1,3
30–40	359	0,61	2,4	4,8	240	5,5	3900	1,0	3,6
10–40	1361	0,84	9,0	1,9	227	2,2	1600	1,2	2,2

установлены для Онежского озера, а наименьшие – для небольшого залива в оз. Инари, что свидетельствует о меньшей интенсивности в нем вертикального турбулентного обмена. Если с ростом температуры и увеличением гравитационной устойчивости вод в этих озерах на протяжении летнего сезона наблюдалось уменьшение коэффициентов температуропроводности, то в их вертикальных распределениях существенных различий не обнаружено (рис. 1, б, е). Для оз. Каллавеси коэффициенты температуропроводности в гиполимнионе были в два-три раза выше, чем в металимнионе (рис. 1, г). Это, вероятно, связано с даунвеллингами, что характерно для крупных глубоких водоемов с удлинённой и сложной формой в плане в результате конвергенции течений и что может объяснить относительно высокую температуру его гиполимниона по сравнению с другими озерами (рис. 1, в). Фоновые значения эффективных коэффициентов температуропроводности для слоев мета- и гиполимниона, рассчитанные по (1) с использованием усредненных данных температуры воды за периоды формирования термических стратификаций в озерах, приведены в таблице.

В соответствии с формулой (3) выполнена аппроксимация усредненных за летние сезоны профилей температуры воды в озерах. Это позволило установить температуру ( $C$ ), до которой озера прогреваются весной в условиях,

близких к гомотермии. В Онежском озере термическая стратификация устанавливается почти сразу после перехода температуры воды через температуру наибольшей плотности ( $4^\circ\text{C}$ ). В оз. Инари изотермическая циркуляция во всей водной толще наблюдается до температуры  $C \approx 5,0-5,5^\circ\text{C}$ , а в оз. Каллавеси термическая стратификация устанавливается в среднем лишь при температуре воды в глубинных слоях  $6-8^\circ\text{C}$  (рис. 1, в). Эффективные коэффициенты температуропроводности, полученные в результате расчетов по (4), усредненные за многолетние периоды развития термических стратификаций в озерах, приведены в таблице. Виртуальные температуры в результате экстраполяции температурных кривых из гиполимниона до поверхности озер ( $C_1$ ) и эмпирические параметры  $a$  не приведены, т. к. являются лишь промежуточным результатом при определении коэффициентов температуропроводности.

В формуле (5) предусмотрен сдвиг фаз между наступлением максимальных значений температуры на разных горизонтах, что позволяет оценивать их теплофизические характеристики. При нагревании/охлаждении озер в условиях однородного вертикального распределения температуры воды в соответствии с уравнением (5)  $K_T \rightarrow \infty$ . Поэтому для корректного описания распространения температурных волн и оценок коэффициентов температуропроводности в условиях стратификации

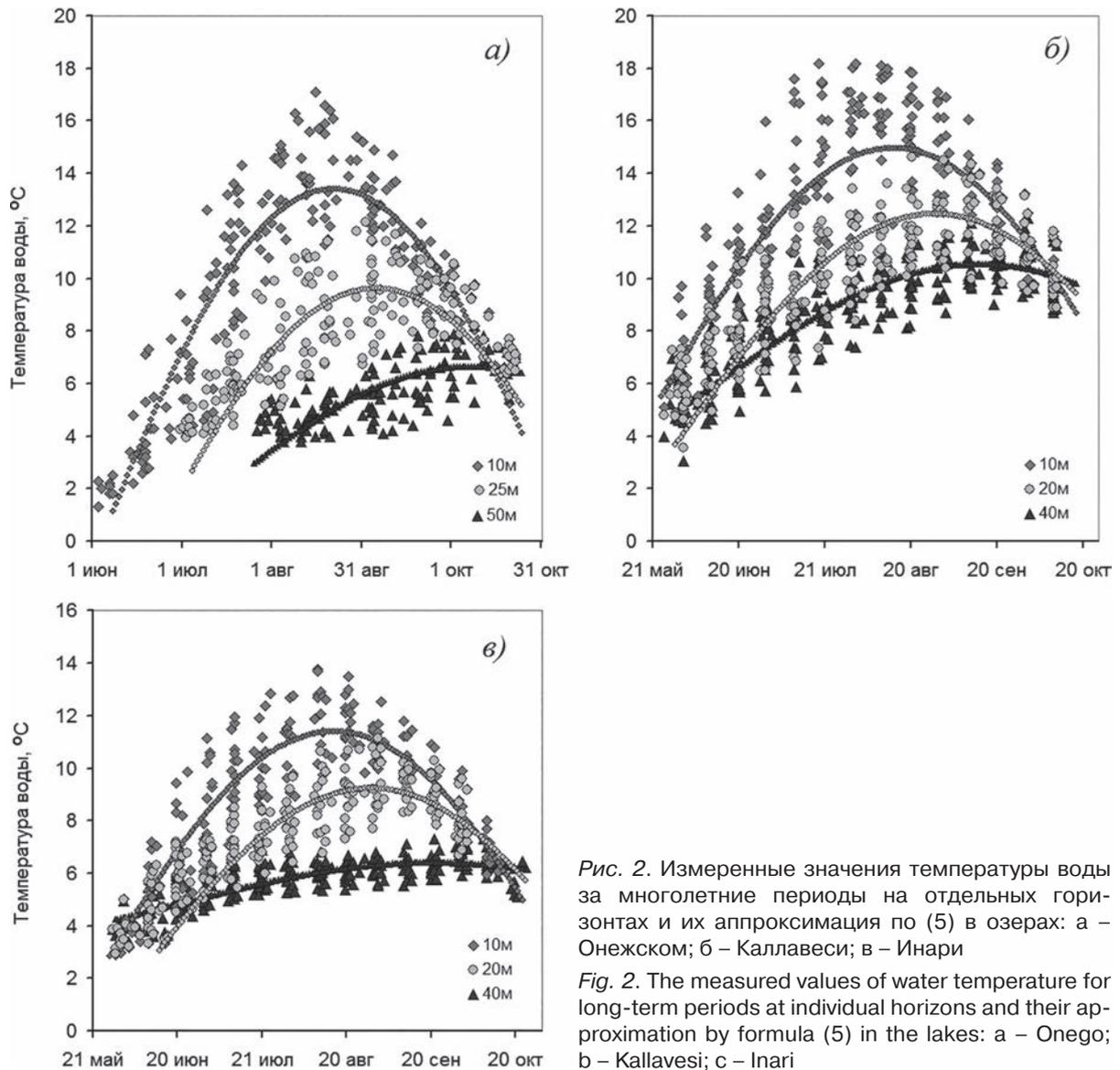


Рис. 2. Измеренные значения температуры воды за многолетние периоды на отдельных горизонтах и их аппроксимация по (5) в озерах: а – Онежском; б – Каллавеси; в – Инари

Fig. 2. The measured values of water temperature for long-term periods at individual horizons and their approximation by formula (5) in the lakes: a – Onego; б – Kallavesi; в – Inari

в водоемах мы исключили из выборок данные, относящиеся к периодам гомотермии в слоях. Верхние горизонты в озерах до 10 м в расчетах не принимались во внимание из-за наличия дополнительного источника тепла (распределенной солнечной радиации в водной толще). Также попытались учесть задержку в распространении температурных волн на глубину. Таким образом, в выборках по каждому озеру были оставлены лишь данные, включающие измерения температуры воды при наличии стратификации на различных горизонтах за периоды 60–70 суток до наступления максимальных прогревов и примерно около 30 суток после достижения максимумов на различных горизонтах. Периоды измерений около трех месяцев близко соответствуют  $\frac{1}{4}$  годовых циклов температурных волн на горизонтах. Использование формулы (5) позволяет аппроксимировать на-

турные данные выборок без их предварительного усреднения с целью получения типичных среднесезонных циклов температуры воды на разных горизонтах для условий формирования стратификации в озерах, оценить неизвестные характеристики:  $K_T$  – фоновые коэффициенты теплопроводности,  $D_{max}$  – даты максимальных температур воды на горизонтах, а также виртуальные параметры – амплитуды ( $T_0$ ) и условные средние значения температуры воды ( $\bar{T}$ ) для полных годовых циклов (за 12 месяцев). Для наглядности на рис. 2 приведены измеренные данные температуры воды на разных горизонтах и усредненные за многолетние периоды кривые, рассчитанные по формуле (5) с учетом установленных параметров (табл.) в результате аппроксимации данных итерационным квази-ньютоновским методом нелинейного оценивания.

Существенным преимуществом данного метода является то, что он позволяет оценивать неизвестные параметры на основании большого количества измерений за продолжительный промежуток времени без их предварительного усреднения (в отличие от двух предыдущих методов), используя при этом одновременно данные нескольких горизонтов. Так, для выделенных слоев металимнионов в озерах использовались данные с горизонтов 10, 15, 20 и 25 м. Для гипolimнионов в озерах Каллавеси, Инари использовались данные с горизонтов 30, 35, 40 м, а для Онежского озера в выборку были дополнительно включены данные с горизонтов 45 и 50 м. Усредненные фоновые коэффициенты температуропроводности были рассчитаны также в целом для водных столбов от 10 до 40–50 м. Оценки установленных параметров для распространения температурных волн в глубину по модели (5) приведены в таблице, где для сравнения также показаны усредненные значения коэффициентов температуропроводности, рассчитанные по формулам (1) и (4) за схожие периоды стратификации.

Эффективные коэффициенты температуропроводности, оцененные разными методами, имеют значения одного порядка (табл.), но при этом в результате расчетов по формуле (5) получены более высокие значения. Это можно объяснить тем, что при оценках по формуле (5) использовались данные за более продолжительные промежутки времени, включающие самые ранние стадии летнего прогрева (начиная от перехода температуры воды через 4 °С) и более поздние сроки, чем при других оценках. На рис. 1 видно, что коэффициенты температуропроводности, существенно превышающие 1 см<sup>2</sup>/с, характерны для ранних стадий летнего прогрева. С развитием стратификации во второй половине июля и августе они становятся меньше 1 см<sup>2</sup>/с. Если бы мы при их оценках по формуле (5) использовали данные за короткие промежутки времени (например, около 30 суток в период максимального прогрева), то, вероятно, получили бы более низкие значения коэффициентов, соответствующие другим методам. Однако в этом случае снижалась бы определенность коэффициентов температуропроводности от фазового сдвига максимумов ( $\cos(\omega t - \sqrt{(\omega/2K_T^2)z})$ ) при распространении температурных волн.

## Обсуждение

Оценки эффективных коэффициентов температуропроводности (10<sup>-1</sup>–10 см<sup>2</sup>/с), получен-

ные на основании расчетов по формулам (1), (4) и (5), согласуются с изменчивостью вертикальных коэффициентов турбулентной диффузии ( $K_V$  от 10<sup>-2</sup> до 10<sup>2</sup> см<sup>2</sup>/с), установленных в результате прямых инструментальных измерений мелкомасштабной турбулентности [Wüest, Lorke, 2003] при разных условиях стратификации в озерах ( $N^2$  от 10<sup>-10</sup> до 10<sup>-1</sup> с<sup>-2</sup>). При этом скорость диссипации  $\varepsilon$  кинетической энергии в данной работе изменялась в среднем на два порядка от ~ 10<sup>-8</sup> до ~ 10<sup>-10</sup> Вт/кг. Для выбранных нами периодов формирования стратификации в озерах Онежском, Каллавеси и Инари диапазоны изменчивости квадратов частоты Брента – Вайсяля составляли от 10<sup>-8</sup> до 10<sup>-3</sup> с<sup>-2</sup>. Наименьшая гравитационная устойчивость в водной толще озер наблюдалась в течение первых 10–20 суток после перехода температуры воды через 4 °С. Этому периоду также соответствуют максимальные значения коэффициентов температуропроводности 1–10 см<sup>2</sup>/с.

В работе [Wüest, Lorke, 2003] водная толща озер разделена на три блока: поверхностный пограничный слой (подверженный интенсивному влиянию ветровых волн, в котором расходуется около 90 % энергии ветра), основная часть стратифицированной глубокой воды и придонный пограничный слой, характеристики турбулентности в которых заметно отличаются. Большая часть механической энергии ветра, проникающей под поверхностный пограничный слой, содержится в возмущениях бароклинного масштаба сейш, волн Кельвина или инерционных течений. Около 3 % потока энергии ветра из атмосферы попадает в мета- и гипolimнион, что позволяет приблизительно оценить содержание механической энергии, расходуемой на перемешивание в основной толще глубокого озера. Турбулентное перемешивание внутри озер происходит в основном спорадическими и локализованными сдвиговыми неустойчивостями типа Кельвина – Гельмгольца. При этом преобразование крупномасштабных движений в мелкомасштабную турбулентность происходит в основном в придонном слое, а не в водной толще, где локальный сдвиг скоростей течений остается слабым. Поэтому, вероятно, в оз. Каллавеси, которое имеет более сложную морфометрию по сравнению с другими озерами, наблюдаются повышенная температура воды в гипolimнионе и сравнительно большие коэффициенты температуропроводности по сравнению с металимнионом, где турбулентность может подавляться стратификацией, а дополнительный перенос тепла в гипolimнион возможен за счет даунвеллингов, что характерно для крупных удлинённых водоемов

со сложной формой в плане. Таким образом, скорости преобразования механической энергии и механизмы ее трансформации имеют решающее значение для развития стратификации и перемешивания в озерах.

## Заключение

Получены оценки эффективных коэффициентов температуропроводности для периода формирования устойчивой термической стратификации в трех димиктических озерах при метеорологических условиях, которые обычно наблюдаются в июне–августе и которые можно использовать в качестве фоновых значений для моделирования и верификации моделей. Озера различаются по своим морфометрическим характеристикам и условиям формирования в них термических стратификаций. Турбулентный перенос тепла в озерах на два–четыре порядка превышает молекулярную величину температуропроводности воды. Вертикальные распределения  $K_T$  слабо зависят от частоты Брента – Вайсяля, т. е. изменений устойчивости по вертикали. Однако наибольшие значения коэффициентов турбулентной диффузии тепла  $> 1 \text{ см}^2/\text{с}$  наблюдаются в течение первых двух–четырех недель после перехода температуры воды через  $4^\circ\text{C}$  (при температуре поверхности озер до  $10\text{--}12^\circ\text{C}$ ). По мере возрастания плотностной устойчивости в металимнионе в период нагревания воды в озерах происходит общее уменьшение величин  $K_T$ . Повышенная турбулентность на ранней стадии летнего прогрева озер, вероятно, играет важную роль для поддержания тяжелых клеток фитопланктона в водной толще.

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

## Литература

Бабич В. М., Капилевич М. Б., Михлин С. Г., Натансон Г. И., Риз П. М., Слободский Л. Н., Смирнов М. М. Линейные уравнения математической физики. М.: Наука, 1964. 368 с.

Болотов А. Г. Метод определения температуропроводности почвы // Вестн. Алт. гос. агр. ун-та. 2015. Т. 7, № 129. С. 74–79.

Крейман К. Д., Голосов С. Д., Сквородова Е. П. Влияние турбулентного перемешивания на фитопланктон // Вод. ресурсы. 1992. Т. 19, № 3. С. 92–97.

Пальшин Н. И., Ефремова Т. В., Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э. Показатель ослабления облученности в озерах Карелии // Изв.

РГО. 2018. Т. 150, вып. 6. С. 58–72. doi: 10.7868/S0869607118060051

Пономарев С. В., Мищенко С. В., Дивин А. Г. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений: В 2 кн. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. Кн. 1. 204 с.

Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. Учебное пособие для вузов. М.: Наука, 1977. 735 с.

Хатчинсон Д. Лимнология. Географические, физические и химические характеристики озер / Пер. с англ. М.: Прогресс, 1969. 592 с.

Хомскис В. Динамика и термика малых озер. Вильнюс: Минтис, 1969. 204 с.

Gibson C. H., Thomas W. H. Effects of turbulence intermittency on growth inhibition of a red tide dinoflagellate, *Gonyaulax polyedra* Stein // J. Geophys. Res. 1995. Vol. 100, no. 12. P. 24841–24846. doi: 10.1029/95JC02256

Haren H. Turbulent convection and high frequency internal wave details in 1 m shallow waters // Limnol. Oceanogr. 2019. Vol. 64. P. 1323–1332. doi: 10.1002/lno.11118

Kuusisto E. Suomen Vestöjen Lämpötilat Kaudella 1961–1975. Water temperature of lakes and rivers in Finland in the period 1961–1975. Vesihallitus – National board of waters, Finland, Helsinki, 1981. 40 p.

Mashayek A., Salehipour H., Bouffard D., Caulfield C. P., Ferrari R., Nikurashin M., Peltier W. R., Smyth W. D. Efficiency of turbulent mixing in the abyssal ocean circulation // Geophys. Res. Lett. 2017. Vol. 44. P. 6296–6306. doi: 10.1002/2016GL072452

Osborn T. R. Estimates of the local rates of vertical diffusion from dissipation measurements // J. Phys. Oceanogr. 1980. Vol. 10. P. 83–89. doi: 10.1175/1520-0485(1980)010<0083: EOTLRO>2.0.CO;2

Osborn T. R., Cox C. S. Oceanic fine structure // Geophys. Fluid Dyn. 1972. Vol. 3. P. 321–345.

Peeters F., Kerimoglu O., Straile D. Implications of seasonal mixing for phytoplankton production and bloom development // Theor. Ecol. 2013. Vol. 6. P. 115–129. doi: 10.1007/s12080-012-0164-2

Reynolds C. S. The ecology of phytoplankton. New York: Cambridge Univ. Press, 2006. 535 p.

Salehipour H., Peltier W. R. Diapycnal diffusivity, turbulent Prandtl number and mixing efficiency in Boussinesq stratified turbulence // J. Fluid Mech. 2015. Vol. 775. P. 464–500. doi: 10.1017/jfm.2015.305

Thomas W. H., Gibson C. H. Quantified small-scale turbulence inhibits a red tide dinoflagellate, *Gonyaulax polyedra* Stein // Deep Sea Res. 1990. Part A. Vol. 37, no. 10. P. 1583–1593.

Winder M., Sommer U. Phytoplankton response to a changing climate // Hydrobiologia. 2012. Vol. 698. P. 5–16. doi: 10.1007/s10750-012-1149-2

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

Yang Y., Colom W., Pierson D., Pettersson K. Water column stability and summer phytoplankton dynamics in a temperate lake (Lake Erken, Sweden) // Inland Waters. 2016. Vol. 6. P. 499–508. doi: 10.1080/IW-6.4.874

Поступила в редакцию 22.05.2019

## References

*Babich V. M., Kapilevich M. B., Mikhlin S. G., Natan-son G. I., Reese P. M., Slobodskii L. N., Smirnov M. M.* Lineinye uravneniya matematicheskoi fiziki [Linear equations of mathematical physics]. Moscow: Nauka, 1964. 368 p.

*Bolotov A. G.* Metod opredeleniya temperaturoprovodnosti pochvy [Soil thermal diffusivity determination method]. *Vestn. Alt. gos. agr. un-ta* [Bull. Alt. St. Agr. Univ.]. 2015. Vol. 7, no. 129. P. 74–79.

*Chomskis V.* Dinamika i termika malykh ozer [Dynamics and thermals of small lakes]. Vilnius: Minthis, 1969. 204 p.

*Hutchinson G. E.* A treatise on limnology. Geography, physics, and chemistry. London, 1957. 592 p.

*Kreiman K. D., Golosov S. D., Skovorodova E. P.* Vliyaniye turbulentnogo peremeshivaniya na fitoplankton [Effect of turbulent mixing on phytoplankton]. *Vod. resour-sources* [Water Res.]. 1992. Vol. 19, no. 3. P. 92–97.

*Pal'shin N. I., Efremova T. V., Zdorovennova G. E., Zdorovennov R. E.* Pokazatel' oslableniya obluchennosti v ozerakh Karelii [Irradiance attenuation index in lakes of Karelia]. *Izv. RGO* [The RGS Herald]. 2018. Vol. 150, no. 6. P. 58–72. doi: 10.7868/S0869607118060051

*Ponomarev S. V., Mishchenko S. V., Divin A. G.* Teoreticheskie i prakticheskie aspekty teplofizicheskikh izmerenii: V 2 kn. [Theoretical and practical aspects of thermophysical measurements (in 2 vol.)]. Tambov: Tamb. gos. tekhn. un-t, 2006. B. 1. 204 p.

*Tikhonov A. N., Samarskii A. A.* Uravneniya matematicheskoi fiziki. Ucheb. posobie dlya vuzov [Equations of mathematical physics: a university textbook]. Moscow: Nauka, 1977. 735 p.

*Gibson C. H., Thomas W. H.* Effects of turbulence intermittency on growth inhibition of a red tide dinoflagellate, *Gonyaulax polyedra* Stein. *J. Geophys. Res.* 1995. Vol. 100, no. 12. P. 24841–24846. doi: 10.1029/95JC02256

*Haren H.* Turbulent convection and high frequency internal wave details in 1 m shallow waters. *Limnol. Oceanogr.* 2019. Vol. 64. P. 1323–1332. doi: 10.1002/lno.11118

*Kuusisto E.* Suomen Vestöjen Lämpötilat Kaudella 1961–1975 [Water temperature of lakes and rivers in Finland in the period 1961–1975]. Vesihallitus – National board of waters, Finland, Helsinki, 1981. 40 p.

*Mashayek A., Salehipour H., Bouffard D., Caulfield C. P., Ferrari R., Nikurashin M., Peltier W. R., Smyth W. D.* Efficiency of turbulent mixing in the abyssal ocean circulation *Geophys. Res. Lett.* 2017. Vol. 44. P. 6296–6306. doi: 10.1002/2016GL072452

*Osborn T. R.* Estimates of the local rates of vertical diffusion from dissipation measurements *J. Phys. Oceanogr.* 1980. Vol. 10. P. 83–89. doi: 10.1175/1520-0485(1980)010<0083:EOTLRO>2.0.CO;2

*Osborn T. R., Cox C. S.* Oceanic fine structure *Geophys. Fluid Dyn.* 1972. Vol. 3. P. 321–345.

*Peeters F., Kerimoglu O., Straile D.* Implications of seasonal mixing for phytoplankton production and bloom development. *Theor. Ecol.* 2013. Vol. 6. P. 115–129. doi: 10.1007/s12080-012-0164-2

*Reynolds C. S.* The ecology of phytoplankton. New York: Cambridge Univ. Press, 2006. 535 p.

*Salehipour H., Peltier W. R.* Diapycnal diffusivity, turbulent Prandtl number and mixing efficiency in Boussinesq stratified turbulence. *J. Fluid Mech.* 2015. Vol. 775. P. 464–500. doi: 10.1017/jfm.2015.305

*Thomas W. H., Gibson C. H.* Quantified small-scale turbulence inhibits a red tide dinoflagellate, *Gonyaulax polyedra* Stein *Deep Sea Res.* 1990. Part A. Vol. 37, no. 10. P. 1583–1593.

*Winder M., Sommer U.* Phytoplankton response to a changing climate. *Hydrobiologia.* 2012. Vol. 698. P. 5–16. doi: 10.1007/s10750-012-1149-2

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

*Yang Y., Colom W., Pierson D., Pettersson K.* Water column stability and summer phytoplankton dynamics in a temperate lake (Lake Erken, Sweden). *Inland Waters.* 2016. Vol. 6. P. 499–508. doi: 10.1080/IW-6.4.874

Received May 22, 2019

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### 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

### Богданов Сергей Рэмович

ведущий научный сотрудник лаб. гидрофизики 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

## CONTRIBUTORS:

### Palshin, Nikolai

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

### Bogdanov, Sergey

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

**Ефремова Татьяна Владимировна**

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: efremova@nwpi.krc.karelia.ru

**Кузина Анастасия Олеговна**

Петрозаводский государственный университет  
пр. Ленина, 33, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: a.o.kuzina@yandex.ru

**Efremova, Tatyana**

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

**Kuzina, Anastasia**

Petrozavodsk State University  
33 Lenin St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: a.o.kuzina@yandex.ru

УДК 551.465: [57.045 + 504.61] (268.46)

## ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ «БЕЛОЕ МОРЕ – ВОДОСБОР»

Н. Н. Филатов<sup>1</sup>, Л. Е. Назарова<sup>1</sup>, П. В. Дружинин<sup>2</sup>

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

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

Выполнены исследования изменчивости климата и оценено ее влияние на сток рек и некоторые экономические процессы на водосборе, в том числе на рыболовство – одно из основных занятий населения Беломорья. Отмечается, что потепление климата за последние 60 лет не привело к ощутимым изменениям (отсутствует значимый тренд) среднегодового стока рек, но выразилось в повышении температуры воды рек и Белого моря, оказывающем заметное влияние на его экосистемы. Наибольшее повышение температуры характерно для зимних месяцев, особенно для января (средние значения за 1991–2017 гг. превышают климатические нормы на 1,7–2,5 °С). Изменения стока за последние десятилетия (после 1977 г.) по отношению к предыдущему периоду для всех водотоков незначительны и разнонаправлены. В период наибольшего потепления климата на водосборе, с 1987 по 2015 г., суммарный сток варьировал в пределах 200–310 км<sup>3</sup>/год, при среднемноголетнем за это время около 230 км<sup>3</sup>/год. Увеличение температуры воды рек водосбора начиная с середины 1980-х годов наблюдается в среднем на 1 °С, эти изменения коррентны колебаниям температуры воздуха на водосборах рассматриваемых рек. Наблюдаемый прогрев вод Белого моря при потеплении климата неблагоприятно сказывается на продуктивности сельди и наваги – рыбы арктического происхождения. По большинству показателей (атмосферные выбросы, сброс сточных вод и др.) экологическая ситуация на водосборе улучшается с 1992 года за счет спада экономики, а в 2000-х годах – из-за изменения структуры экономики, а также инвестиций в модернизацию производств и природоохранные проекты.

Ключевые слова: море; водосбор; климат; экономика; экосистемы; сток рек; рыболовство.

### **N. N. Filatov, L. E. Nazarova, P. V. Druzhinin. INFLUENCE OF CLIMATIC AND ANTHROPOGENIC FACTORS ON THE WHITE SEA – CATCHMENT SYSTEM**

Variability of the regional climate is investigated, and its impact on river runoff and some economic processes in the catchment, including fisheries – one of the main livelihoods of the local population – is evaluated. Warming of the regional climate over the past 60 years has not led to any tangible change in mean annual river runoff (no significant trend observed), but was evident in the increase of the water temperature in rivers and the White Sea. The greatest temperature increase is typical for winter months, especially January (mean values over 1991–2017 exceed the climatic norms by 1.7–2.5 °C). The change in flow over the past decades (since 1997) as compared to the preced-

ing period is multidirectional and not significant. During the maximal climate warming in the catchment in 1987–2015, total river runoff varied within 200–310 km<sup>3</sup>/yr, the average over this period being ca. 230 km<sup>3</sup>/yr. The water temperature in rivers in the catchment has increased since the mid-1980's by an average of 1 °C; these variations are coherent to air temperature fluctuations over the catchments of the respective rivers. The observed excessive summer heating of the White Sea under climate warming unfavorably affects the productivity of herring and navaga, fish of the Arctic origin. Since the 1990's, ecological parameters such as atmospheric emissions and effluent discharges have changed for the better because of the regional economy decline, and since the 2000's – owing to changes in the structure of the economy and investments in technological upgrade and nature conservation measures.

**Key words:** sea; catchment; climate; economy; ecosystems; river runoff; fisheries.

## Введение

Основная цель исследований – изучить влияние изменений климата и экономической деятельности на состояние Белого моря и водосбора (Беломорья), которые определяют условия проживания населения региона. Для этого необходимо провести системные эколого-социо-экономические исследования, создать информационную основу для разработки когнитивной модели. Предполагается разработать более совершенную, чем созданная ранее, когнитивную модель системы Беломорья [Меншуткин и др., 2018]. Важной задачей для создания такой модели (моделей) является сбор информации об изменении и изменчивости климата, стоке и температуре воды рек, влияющих на формирование гидрологического режима и экосистем моря. Важно также оценить влияние состояния экономики на окружающую среду Беломорья, развитие промышленности, лесного и сельского хозяйства, рыболовства – важных отраслей экономики региона, определяющих условия жизни населения.

Водосбор Белого моря составляет более 10 % Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) и занимает около 720 тыс. км<sup>2</sup>, включает значительную часть территорий Мурманской, Архангельской, Вологодской областей, Республики Карелия и Республики Коми, а также небольшую часть Кировской области и Ненецкого автономного округа. При этом Вологодская, Кировская области и Республика Коми (за исключением города Воркуты) не входят в АЗРФ, но играют важную роль в формировании комплекса процессов на водосборе Белого моря. Анализ состояния экономики Беломорья в последние три десятилетия показал, что развитие региона сдерживается наличием большого количества проблем, обусловленных суровым климатом, относительной удаленностью от центра, высокими затратами на производство и социальную сферу и ограниченным локальным рын-

ком [Белое..., 2007; Лаженцев, 2013; Дружинин и др., 2018]. Это определяет низкую плотность населения, концентрированность его в небольшом количестве населенных пунктов, в основном на побережье Белого моря, где традиционным занятием поморов была рыбная ловля и ма-рикультура. Для устойчивого развития региона требуется соблюдение особого режима природопользования, при этом основные секторы экономики – добывающий и переработка ресурсов (металлургия, бумажная промышленность, деревообработка), в которые вкладываются основные инвестиции, являются главными источниками, негативно влияющими на состояние водосбора и экосистем Белого моря.

В последние 30 лет в этом богатом ресурсами регионе наблюдаются заметные изменения климата, а также серьезные кризисные явления в социально-экономических условиях, которые не связаны с оскудением природных ресурсов, а во многом обусловлены особенностями функционирования экономики в новых условиях, несовершенством современной законодательной базы, регламентирующей экономическую и природоохранную деятельность.

## Данные и методы

Ранее Институтом водных проблем Севера КарНЦ РАН совместно с Институтом прикладных математических исследований и Институтом экономики КарНЦ РАН были созданы геоинформационные системы, базы данных, атлас Белого моря и водосбора [Филатов и др., 2014; Электронный..., 2017], оригинальные 3D математические модели термогидродинамики и экосистемы моря [Белое..., 2007; Чернов и др., 2016], модели для оценки состояния и прогноза развития экономики [Дружинин и др., 2018], начаты системные исследования социо-эколого-экономических процессов Беломорья с использованием когнитивных моделей [Меншуткин и др., 2018].

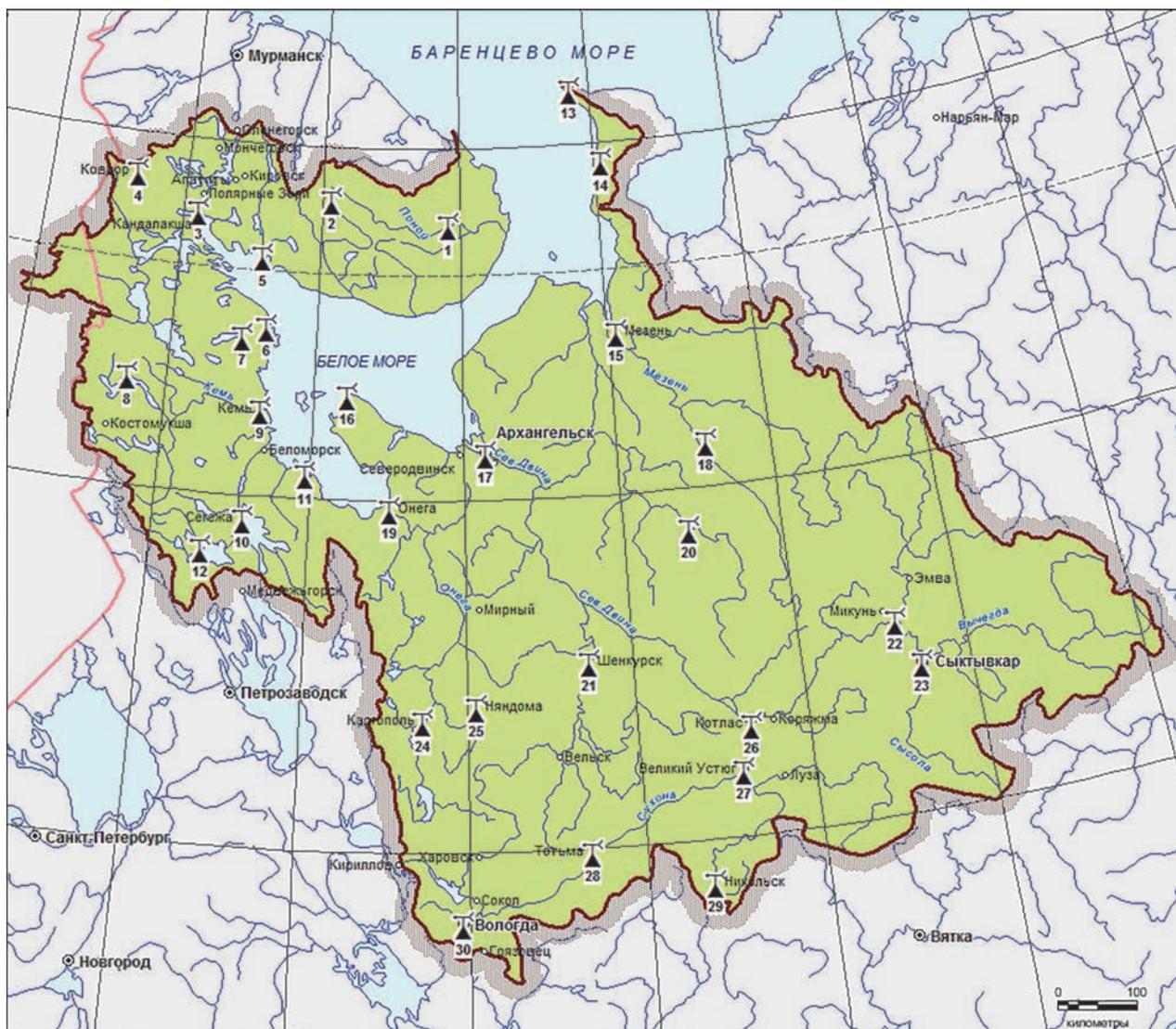


Рис. 1. Схема расположения метеорологических станций Беломорья:

1 – Каневка; 2 – Краснощелье; 3 – Кандалакша; 4 – Ковдор; 5 – Умба; 6 – Гридино; 7 – Энгозеро; 8 – Калевала; 9 – Кемь-порт; 10 – Сегежа; 11 – Колежма; 12 – Паданы; 13 – Канин Нос; 14 – Шойна; 15 – Мезень; 16 – Жижгин; 17 – Архангельск; 18 – Койнас; 19 – Онега; 20 – Сура; 21 – Шенкурск; 22 – Усть-Вымь; 23 – Сыктывкар; 24 – Каргополь; 25 – Няндомы; 26 – Котлас; 27 – Великий Устюг; 28 – Тотма; 29 – Никольск; 30 – Вологда.

Границы водосбора Белого моря выделены контуром

Fig. 1. The meteorological stations location in the White Sea:

1 – Kanevka; 2 – Krasnoshchelye; 3 – Kandalaksha; 4 – Kovdor; 5 – Uмба; 6 – Gridino; 7 – Engozero; 8 – Kalevala; 9 – Kem-port; 10 – Segezha; 11 – Kolezhma; 12 – Padany; 13 – Kanin Nose; 14 – Shoyna; 15 – Mezen; 16 – Zhizhgin; 17 – Arkhangel'sk; 18 – Koynas; 19 – Onega; 20 – Sura; 21 – Shenkursk; 22 – Ust-Vym; 23 – Syktyvkar; 24 – Kargopol; 25 – Nyandoma; 26 – Kotlas; 27 – Veliky Ustyug; 28 – Totma; 29 – Nikolsk; 30 – Vologda.

The boundaries of the White Sea catchment are outlined

Изучение изменчивости климатического режима региона проводилось по данным наиболее длительных инструментальных наблюдений на метеорологических станциях (МС) и постах Федеральной службы РФ по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, расположенных на изучаемой территории, за период от начала наблюдений на станциях по 2017 г. включительно, представленным на сайте Все-

российского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ МЦД). Были использованы данные наблюдений на семи МС Карелии, пяти МС Мурманской области, десяти МС Архангельской и четырех – Вологодской областей, двух МС Ненецкого автономного округа и двух МС Республики Коми (рис. 1).

Для оценки возможных изменений климата и его влияния на экосистему Белого моря по данным о температуре воздуха, воды рек и моря, осадкам, водном стоке рек, впадающих в Белое море, также были использованы результаты длительных наблюдений, собранные на сети и в базе данных Росгидромета.

Для социо-экономических исследований субъектов РФ, входящих в Беломорье, использована информация из региональных и российских сборников [Охрана..., 2018] и с сайтов ФСГС и ее региональных подразделений, ведомств, научных институтов. Оценка состояния экономики была выполнена для каждого субъекта РФ, входящего в Беломорье, по единым требованиям федерального закона от 28 июня 2014 года № 172-ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации» с учетом приказа Минэкономразвития России от 23 марта 2017 года № 132 «Об утверждении Методических рекомендаций по разработке и корректировке стратегии социально-экономического развития субъекта Российской Федерации и плана мероприятий по ее реализации» [Petrov et al., 2017].

Для оценки влияния развития экономики на окружающую среду использовались предложенные ранее мультипликативные модели и следующие показатели: динамика валового регионального продукта (ВРП), промышленного производства, инвестиций в экономику, природоохранных инвестиций, выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, сбросов загрязненных сточных вод, потребления свежей воды и других [Дружинин и др., 2017]. Для оценки влияния климатических изменений на развитие таких секторов экономики, как лесное и сельское хозяйство, были построены модели, которые позволяют выявить оптимальные значения температуры и осадков для развития этих отраслей. Кроме того, использовались климатические, агротехнические и социально-экономические характеристики, в частности: температура воздуха, сумма активных температур и суммарные осадки в разные периоды, температура почвы, высота снежного покрова, количество минеральных и органических удобрений на гектар посевов, объем и динамика инвестиций в развитие сельского хозяйства, уровень развития экономики и другие [Дружинин и др., 2017, 2018; Прокопьев, Рослякова, 2017]. При создании базы данных основных экономических показателей для оценки динамики стоимостных показателей производился их перерасчет в сопоставимые цены через индексы цен, в некоторых расчетах использовались данные в процентах к опреде-

ленному 2015 году, значения показателей которого брались за 100 %. За отдельные годы информация по экономике отсутствовала, поскольку часть сведений оказались конфиденциальными [Дружинин и др., 2018]. Динамика рыболовства региона изучалась по литературным данным и сведениям ГБНУ «ВНИРО» «ГосНИОРХ».

Для расчетов использовалось лицензионное программное обеспечение Statistica 10 и Hydrostatcalc.

## Результаты

### *Состояние и изменения климата Беломорья*

Климат исследуемой территории можно охарактеризовать как субарктический на территории Ненецкого автономного округа; субарктический морской, имеющий черты континентального, – в Мурманской и северо-западной части Архангельской области; переходный от морского к континентальному – на территории Карелии и умеренно-континентальный – на территории Вологодской области и Республики Коми [Назарова, 2017].

Климатические нормы годовой температуры воздуха изменяются от 0 °С на побережье Баренцева и Белого морей, от –1 °С в районе Канина Носа и на северо-западе Архангельской области до –2 °С в центральной части и –3–4 °С в горных районах Кольского п-ова. Самые высокие значения нормы средней годовой температуры воздуха (+2,4...+2,6 °С) характерны для центральных районов Карелии и Вологодской области. Продолжительность безморозного периода увеличивается с севера на юг в среднем от 50–60 дней в Ненецком автономном округе и центральных районах Мурманской области до 120 дней на территории Вологодской области.

Однако если сравнить климатические нормы средней годовой температуры воздуха на водосборе Белого моря за стандартный климатический период 1961–1990 гг. и средние значения за 1991–2017 гг. для различных метеорологических станций, то можно сделать вывод, что в конце XX – начале XXI в. средние многолетние значения годовой температуры воздуха повсеместно превышают климатические нормы на 0,8–1,2 °С (рис. 2).

Также представляет интерес сравнение средних многолетних значений годовой температуры воздуха с нормами предыдущего стандартного периода 1931–1960 гг. для разных МС (табл. 1). Анализ представленных данных показывает, что в течение двух тридцатилетий под-

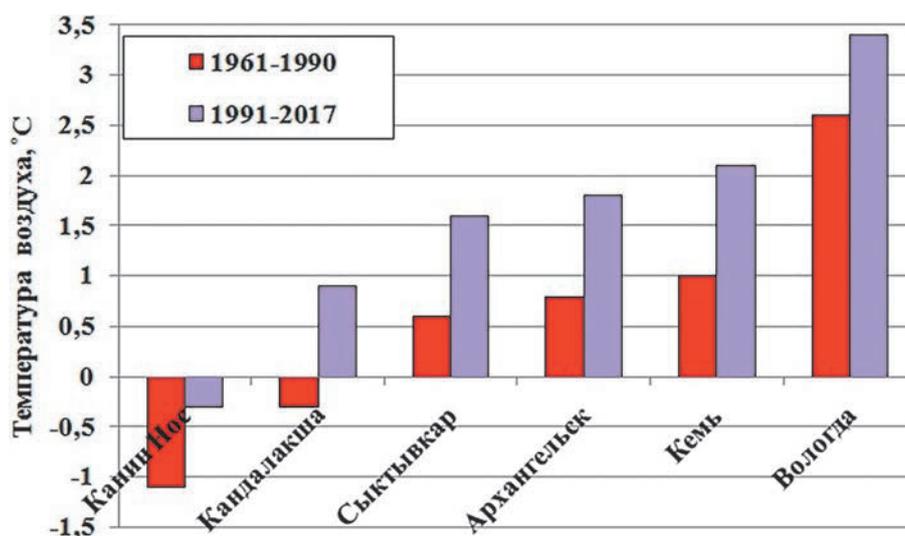


Рис. 2. Средняя годовая температура воздуха по данным метеорологических станций на водосборе Белого моря за периоды 1961–1990 и 1991–2017 гг.

Fig. 2. The average annual air temperature according to the meteorological stations of the White Sea catchment in 1961–1990 and 1991–2017.

ряд, 1931–1960 и 1961–1990 гг., климатические нормы менялись незначительно, а за период 1991–2017 гг. средние величины температуры воздуха возросли почти на 1 °C по сравнению с периодом 1931–1960 гг.

Анализ данных многолетних инструментальных наблюдений за приземной температурой воздуха на метеорологических станциях, расположенных на водосборе Белого моря, позволяет выявить общие черты и тенденции изменения средней годовой температуры в исследуемом районе в течение последнего десятилетия XIX – начале XXI в. Данные наблюдений свидетельствуют о почти синхронном характере изменчивости среднегодовой температуры воздуха по всему водосбору Белого моря (рис. 3).

Для анализа особенностей многолетней динамики значений годовой температуры воздуха

в исследуемом регионе данные наблюдений были представлены в виде аномалий (отклонений от климатической нормы). Результаты для отдельных станций приведены на рис. 4. С начала XX века изменения температуры воздуха не были однонаправленными. Рост температуры с начала века к середине 1950-х годов сменился похолоданием, в 1980-е годы тенденции начинают меняться, и начиная с 1989–1990 годов на территории водосбора Белого моря практически во все годы отмечаются положительные отклонения значений средней годовой температуры воздуха от климатической нормы. Для южных районов исследуемой территории (МС Вологда) в течение последнего десятилетия XIX и до конца XX в. указанные выше тенденции изменений были более сглажены, однако с начала XXI в. в этом районе также наблюдаются положительные аномалии температуры воздуха (рис. 4).

Оценка изменений средних многолетних значений температуры воздуха по месяцам показала, что для разных сезонов года температурный режим меняется неравномерно. Наибольшее повышение температуры характерно для зимних месяцев, особенно для января (средние значения за 1991–2017 гг. превышают климатические нормы на 1,7–2,5 °C) (табл. 2). Средние значения температуры воздуха по месяцам за последние 20 лет на территории водосбора Белого моря превышают климатическую норму во все месяцы, кроме ноября. В ноябре ряд станций (Вологда, Каргополь, Архангельск, Котлас, Сура, Шенкурск) не отмечают значи-

Таблица 1. Средняя годовая температура воздуха, °C  
Table 1. Average annual air temperature, °C

Станция Station	1931–1960	1961–1990	1991–2017
Сыктывкар Syktyvkar	0,5	0,6	1,6
Архангельск Arkhangelsk	1,4	0,8	1,8
Каргополь Kargopol	1,7	1,7	2,8
Онега Onega	1,7	1,5	2,6
Вологда Vologda	2,4	2,6	3,4

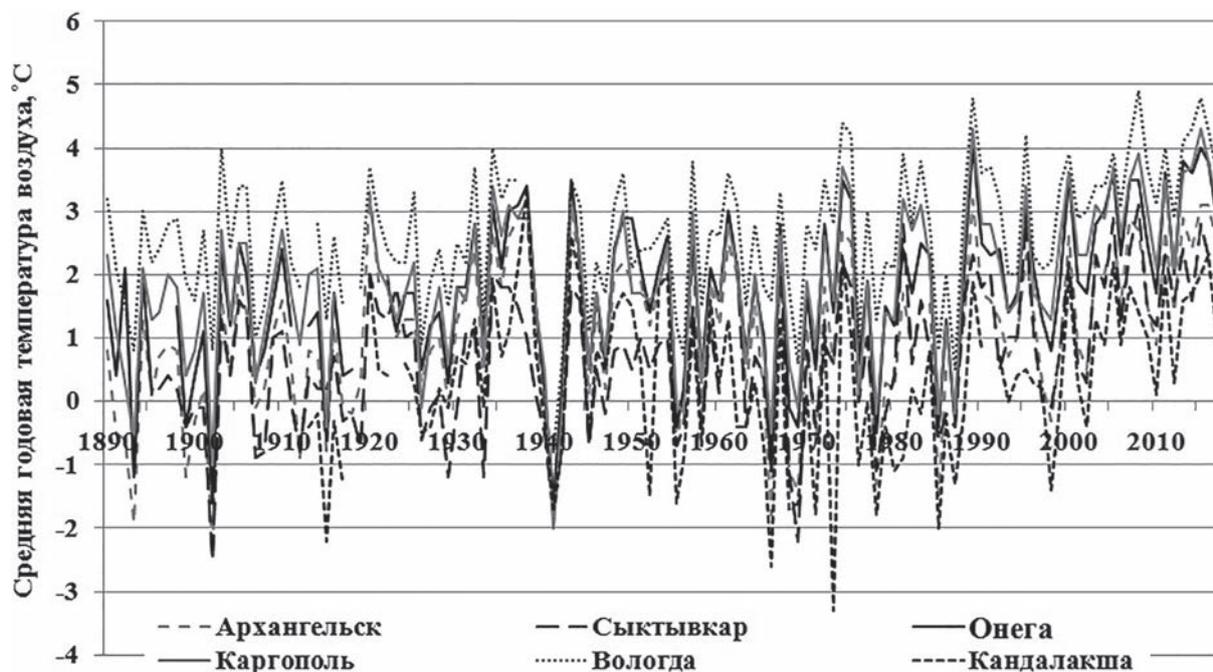


Рис. 3. Многолетняя динамика средней годовой температуры воздуха на водосборе Белого моря, °С. 1890–2017 гг.

Здесь и далее: по оси абсцисс – годы

Fig. 3. Long-term dynamics of the average annual air temperature of the White Sea catchment, °C. 1890–2017

Hereinafter: abscissa – years

мых изменений в температурном режиме этого месяца.

В зимние месяцы, для которых характерно наибольшее повышение средних месячных значений температуры воздуха, отмечается повсеместное уменьшение числа дней без оттепели. Днем без оттепели считается день с максимальной суточной температурой воздуха не выше 0 °С. Сокращение числа дней без

оттепели на 6–12 дней в течение зимнего сезона отмечается повсеместно на территории водосбора Белого моря. Тенденции к снижению числа дней без оттепели отмечаются с начала 2000-х годов.

Оттепели на территории водосбора Белого моря наблюдаются в холодный период года при прохождении циклонов, образовавшихся над Атлантикой. Усиление западного переноса

Таблица 2. Средняя месячная температура воздуха (°С)

Table 2. Average monthly air temperature (°C)

Месяц Month	Кандалакша Kandalaksha		Архангельск Arkhangelsk		Вологда Vologda	
	1961–1990	1991–2017	1961–1990	1991–2017	1961–1990	1991–2017
I	-13,5	-11,5	-14,5	-12,0	-12,8	-10,3
II	-12,9	-11,1	-12,2	-11,0	-10,8	-9,5
III	-7,7	-6,1	-6,2	-5,5	-4,6	-4,1
IV	-1,8	-0,7	-0,2	0,7	2,8	3,7
V	4,2	5,2	6,5	7,4	10,4	10,8
VI	10,1	11,4	12,6	13,1	14,8	15,2
VII	14,4	14,9	15,8	16,5	17,0	17,8
VIII	11,9	12,5	13,2	13,6	14,7	15,1
IX	6,7	7,6	7,8	8,7	9,0	9,7
X	0,9	1,4	1,6	2,5	3,0	3,4
XI	-5,6	-4,7	-4,6	-4,5	-3,4	-3,3
XII	-10,7	-8,4	-10,3	-8,4	-8,9	-7,4

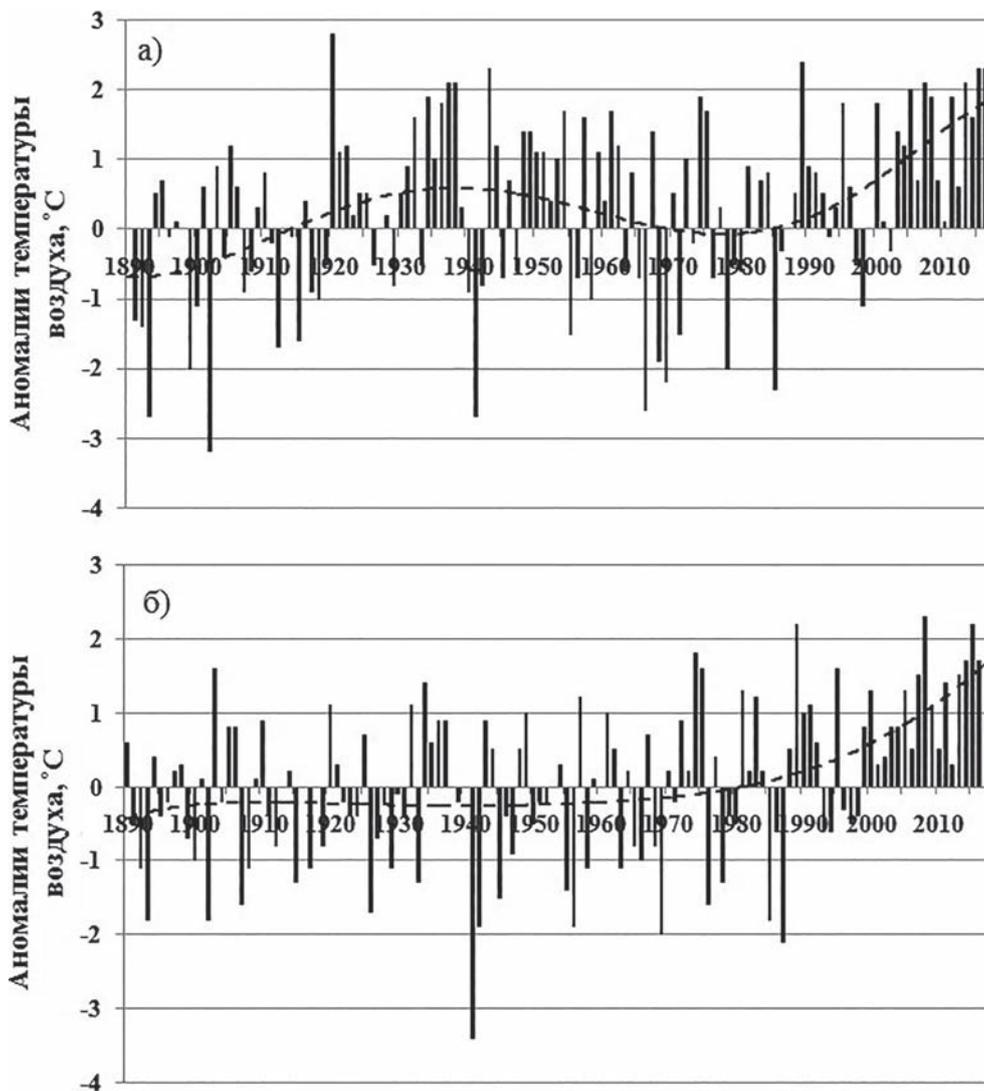


Рис. 4. Отклонения средней годовой температуры воздуха от климатической нормы (1961–1990), °С, МС Архангельск (а) и МС Вологда (б). Пунктирная линия – полиномиальный тренд 6-й степени. 1890–2017 гг.

Fig. 4. Deviations of the average annual air temperature from the climatic norm (1961–1990), °C, Arkhangelsk MS (a) and Vologda MS (b). The dotted line – polynomial trend of the 6th degree. 1890–2017

и циклонической активности определяет понижение атмосферного давления. Анализ данных наблюдений показывает, что именно в зимние месяцы отмечается понижение атмосферного давления относительно климатической нормы, что происходит в условиях поступления теплых и влажных атлантических воздушных масс [Назарова, 2017].

Вся территория водосбора Белого моря расположена в зоне избыточного увлажнения. Годовое количество осадков колеблется от 400 мм на севере Ненецкого автономного округа до 500–650 мм в Вологодской области и Карелии и 700 мм на территории Республики Коми. В горных районах Мурманской области

за год выпадает 900–1300 мм атмосферных осадков [Назарова, 2017].

Согласно данным Второго оценочного доклада Росгидромета об изменениях климата на территории Российской Федерации [IPCC, 2014], за период 1936–2010 гг. отмечается увеличение годовых сумм осадков практически на всей территории европейской части России (ЕЧР). На водосборе Белого моря средние значения годовых сумм атмосферных осадков за 1991–2017 гг. превышают климатические нормы на 40–80 мм. Однако по данным наблюдений отдельных метеорологических станций (Жижгин, Койнас, Тотьма, Вологда, Сура), в начале XXI века отмечалась слабая тенденция

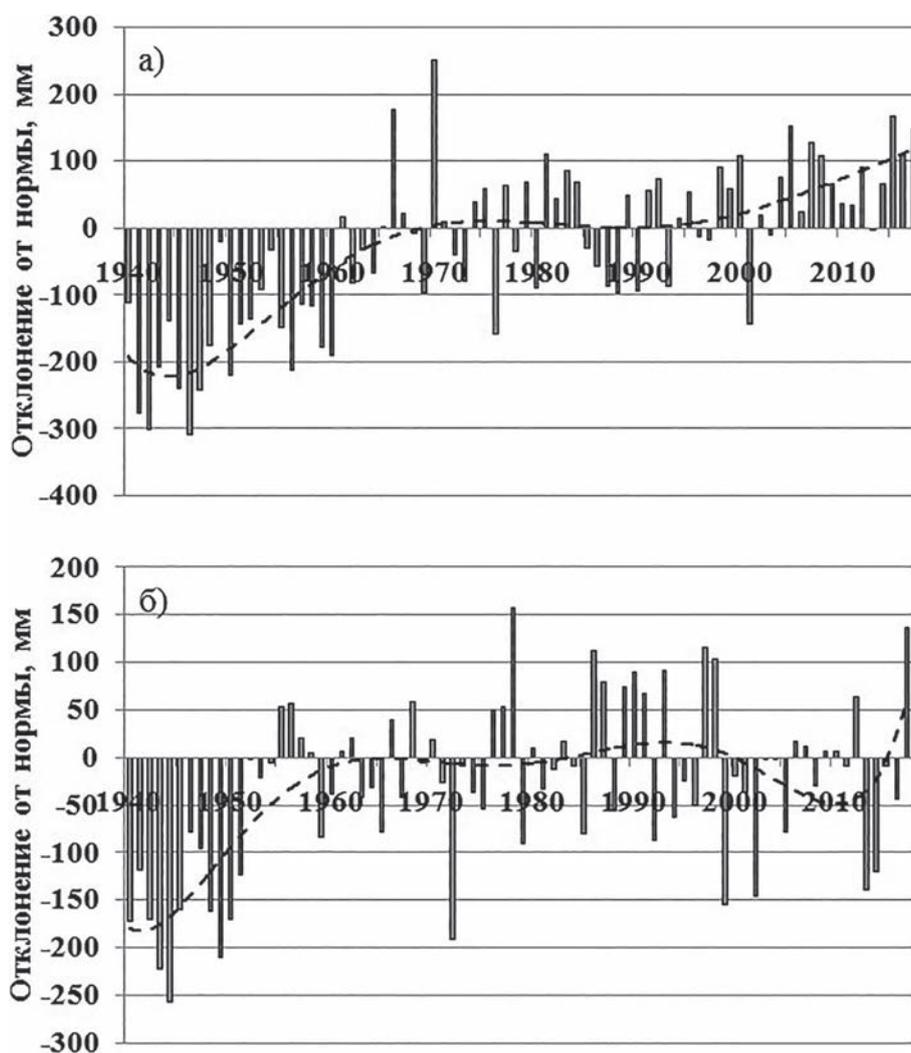


Рис. 5. Отклонения годовых сумм атмосферных осадков (мм) от климатической нормы (1961–1990 гг.), МС Кандалакша (а) и МС Вологда (б). 1940–2017 гг.

Fig. 5. Deviations of annual precipitation (mm) from the climatic norm (1961–1990), Kandalaksha MS (a) and Vologda MS (b). 1940–2017

к уменьшению средних многолетних годовых значений. Оценивая отклонения от нормы годовых сумм атмосферных осадков по данным измерений, проводившихся на метеостанциях, можно сделать следующие выводы. До 1960 г. годовые суммы измеренных осадков были значительно ниже нормы, что объясняется недоучетом осадков в этот период из-за существовавшей в то время практики измерений. В последние 17–20 лет, по данным наблюдений большинства станций (кроме указанных выше), преобладают положительные аномалии годовых сумм атмосферных осадков (рис. 5).

Количество твердых осадков за год (снег, крупа, снежные зерна, ледяной дождь, град), по данным наблюдений всех метеостанций, расположенных на водосборе Белого моря, значительно сократилось (в среднем на 30–50 мм).

При этом повсеместно возросла доля смешанных осадков (мокрый снег, дождь со снегом). Увеличение доли смешанных осадков хорошо согласуется с увеличением повторяемости оттепелей в течение холодного периода года.

Также отмечены изменения во внутригодовом режиме выпадения твердых осадков. Начало периода с твердыми осадками в осенний сезон сместилось на месяц позже. Окончание этого периода весной также отмечается на месяц раньше: для северных районов водосбора Белого моря – в мае, для южных – в апреле. Таким образом, продолжительность периода, в течение которого наблюдается выпадение твердых осадков, сократилась примерно на два месяца на всей территории Беломорья.

Сравнение данных наблюдений в течение 1991–2017 гг. с климатической нормой пока-

зывает, что в обозначенный период число дней со снежным покровом было несколько ниже или соответствовало средним многолетним значениям, средняя декадная высота снежного покрова также была в пределах климатической нормы.

Таким образом, анализ данных многолетних наблюдений за основными параметрами и характеристиками климата позволяет сделать следующие выводы. Начиная с 1989 года на территории водосбора Белого моря преобладают положительные аномалии средней годовой температуры воздуха (1–2 °С). Наиболее интенсивное потепление отмечается в зимние месяцы, что сопровождается частым наступлением оттепелей при прохождении циклонов, сформировавшихся над Атлантикой. Усиление западного переноса и циклонической активности является причиной понижения атмосферного давления, особенно в холодный период года. Анализ изменений количества осадков в районе исследований показывает, что в целом наблюдается рост годовых сумм выпавших атмосферных осадков (в среднем на 40–80 мм за год). Высота снежного покрова и продолжительность его залегания в основном находятся в пределах климатических норм. Все эти изменения должны сказываться на состоянии окружающей среды Беломорья.

#### *Изменчивость стока и температуры воды рек бассейна Белого моря*

По данным наблюдений за 1950–2015 гг. была изучена изменчивость стока и температуры воды рек Беломорья. Для выполнения гидрологических расчетов использовались ряды по стоку 24 рек – притоков Белого моря, наиболее изученных в гидрологическом отношении. Рассмотрен анализ изменчивости среднегодового стока, оценены линейные тренды и другие вероятностные характеристики. На рис. 6 представлены графики изменчивости и линейные тренды среднегодовых значений стока рек за период 1950–2015 гг.

Анализ данных показал, что колебания годового стока рек на водосборе Беломорья различны по цикличности, линейным трендам. Для большинства рек отмечено незначительное увеличение годового стока, а для рек Мезень и Сума – его уменьшение. Изменения стока за последние десятилетия (после 1977 г.) по отношению к предыдущему периоду для всех водотоков незначительны (в пределах ошибки их оценки) и разнонаправлены. В работе [Георгиевский, 2015] показано, что климатические изменения оказывают небольшое влия-

ние на многолетние колебания речного стока и очень значительное влияние на внутригодичное его распределение. Как и для преобладающей части стока рек ЕЧР, водность большинства рек на водосборе Беломорья несколько увеличилась. В этой же статье показано, что отмечаются значимые положительные тренды зимнего стока, при этом существенно увеличилась его изменчивость. Установлено, что повышение зимней температуры привело к уменьшению глубины промерзания почвы и увеличению ее дренирующих свойств, возрастанию количества и продолжительности зимних оттепелей, во время которых происходит снеготаяние и водоотдача из снежного покрова, пополнение запасов грунтовых вод и формирование поверхностного стока.

На рис. 7 представлен хронологический график изменчивости суммарного годового стока рек (по 24 рекам) в Белое море за период 1956–2015 гг., на котором прослеживается незначительный положительный линейный тренд.

В период наибольшего потепления климата с 1987 по 2015 гг. суммарный годовое стока на водосборе варьировал в пределах 200–310 км<sup>3</sup>/год при среднем многолетнем значении 230 км<sup>3</sup>/год.

Изменения климата отразились также и на изменении температуры воды рек, впадающих в Белое море. На рис. 8 показана изменчивость среднегодовой температуры воды в поверхностном слое рек по результатам наблюдений за 1960–2015 гг.

Прослеживается постепенное уменьшение температуры воды с 1960 по 1980 гг., а начиная с середины 1980-х годов (при потеплении климата) – ее увеличение в среднем на 1 °С. Изменения температуры поверхности воды (ТПВ) рек когерентны изменениям температуры воздуха на водосборах рассматриваемых рек (квадрат когерентности 0,80). Отмечаются также квазициклические, относительно короткопериодные (несколько лет) флуктуации, как и относительно короткопериодные изменения температуры воздуха.

Похожие тенденции отмечаются и в изменениях ТПВ Белого моря по данным измерений на гидрометеостанциях и постах [Белое..., 2007]. А. В. Толстиком [2016] были изучены особенности ТПВ Белого моря в интервалах межгодовой, внутригодовой, сезонной, синоптической и мезомасштабной изменчивости. Установлено, что основной вклад в изменчивость межгодовых колебаний вносят квазидвухлетние и квазипятилетние колебания.

Инструментальные измерения температуры воды, выполненные на постоянной вер-

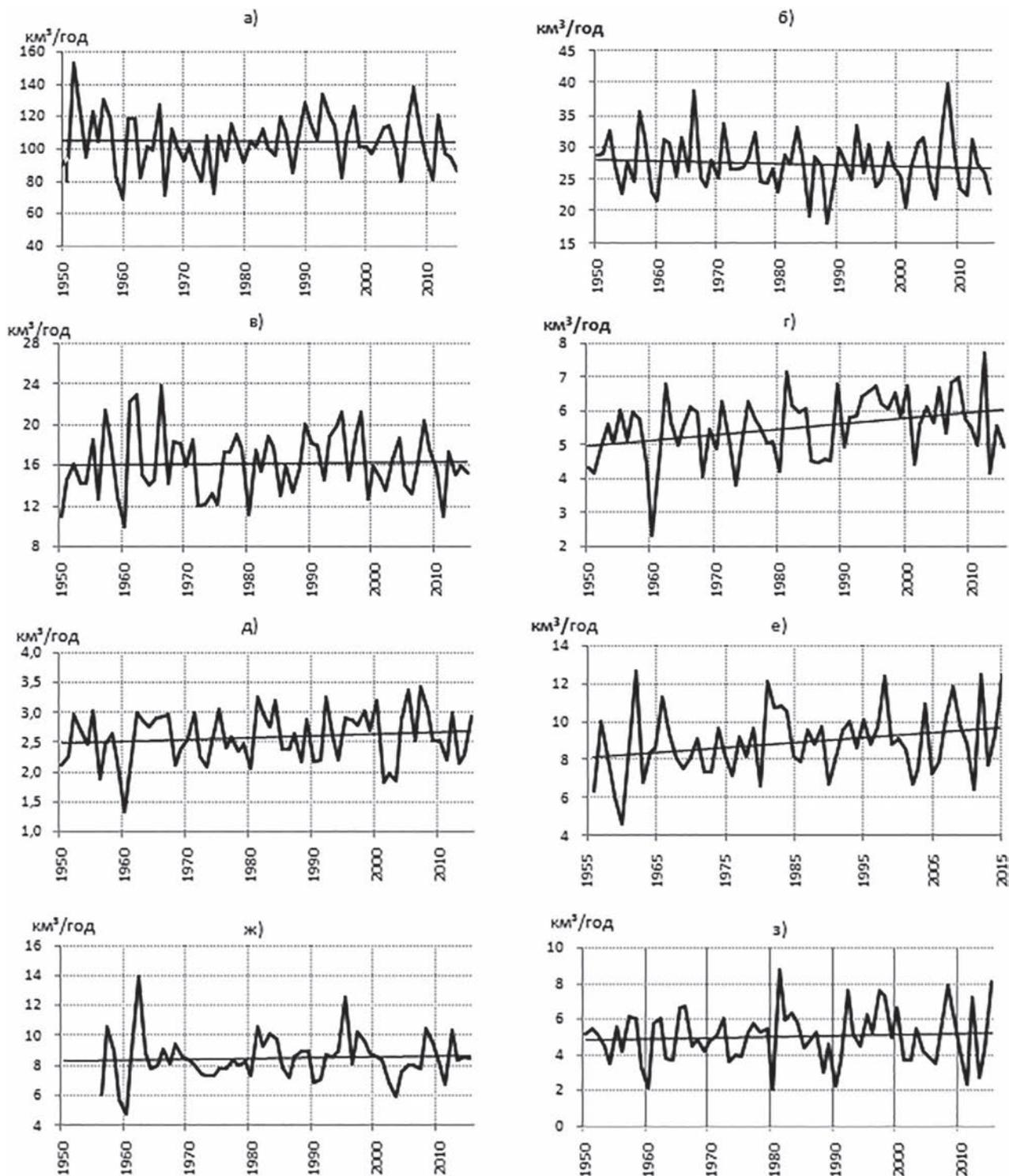


Рис. 6. Изменчивость среднегодовых значений стока рек Беломорья за 1950–2015 гг.:

а) Северная Двина; б) Мезень; в) Онега; е) Поной; д) Умба; е) Кемь; ж) Выг; з) Гридина. Линейные тренды показаны прямой линией

Fig. 6. Variability of the average annual White Sea rivers runoff in 1950–2015:

а) Northern Dvina; б) Mesen; в) Onega; е) Ponoj; е) Umba; е) Kem; г) Vyg; h) Gridina. Linear trends are shown by the straight line

тикали ЗИН РАН (станция Д-1, 66°19'50" N, 33°40'06" E) на горизонтах 0, 5, 10, 25, 50 и 65 м, показали, что наиболее низкие значе-

ния среднегодовой температуры воды Белого моря отмечались в середине 60-х и конце 70-х, а максимальные – в конце 80-х и сере-

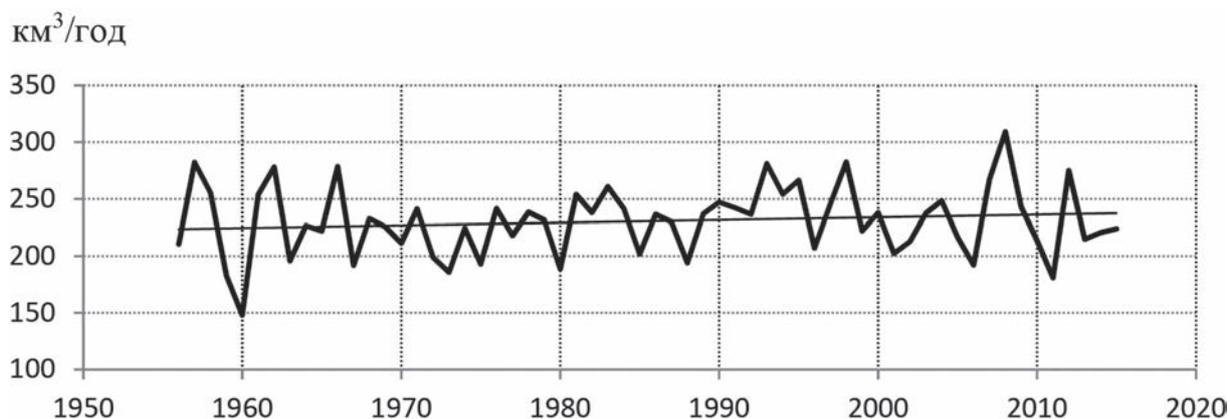


Рис. 7. Изменчивость и линейный тренд суммарного годового стока в Белое море за период 1956–2015 гг.

Fig. 7. Variability and the linear trend of the total annual runoff to the White Sea in 1956–2015

дине 90-х годов XX в. Изменения температуры воды в придонном горизонте на глубине 65 м за 1977–2008 гг. имеют заметный тренд, как и изменения температуры воздуха. В придонном горизонте отмечается увеличение температуры воды на 0,5 °С, что согласуется с тенденциями изменений климата [Толстикова, 2016].

Длительные измерения температуры воды всей толщи моря в других районах Белого моря отсутствуют. Для характеристики изменчивости температуры воды всей толщи вод Белого моря использовались также данные расчетов ТВ на 3D-модели JASMINE, верифицированной по данным измерений [Толстикова и др., 2018]. Это важно для того, чтобы оценить возможности влияния изменений температуры воды на экосистему, в особенности на рыб, обитающих не только в пелагиали, но и в бентали.

#### *Изменения рыбного промысла под влиянием климата и экономики Беломорья*

Рыболовство в Белом море начиная с XVI–XVII вв. является одной из основ развития экономики Поморья. На особенности развития рыбопромысловой отрасли региона оказывали и оказывают влияние не только природные климатические процессы, но и экономика. Последние 25–30 лет работа рыбопромысловой отрасли Беломорья подвержена весьма резким изменениям, происходящим из-за социально-экономических процессов и особенностей законодательства (лицензирование, квоты, запреты на вылов) [Фомин, 2016; Арктические..., 2018; Куценко, 2018]. К концу XX в. по сравнению с его началом численность населения Беломорского региона, занятого в рыбном промысле, сократилась почти на порядок [Стасенков, 2016]. По состоянию на 2010 г. морской промысел в Белом море осуществлялся более

чем 40 компаниями и индивидуальными предпринимателями. Суммарный улов составлял около 800 т/год, для сравнения – в 1950-х годах суммарные уловы одной только сельди составляли 4–4,5 тыс. т, а общие уловы наваги в начале 1980-х годов достигали 2,5 тыс. т/год. К тому же Росрыболовство периодически вводило и продолжает вводить сезонные ограничения на вылов различных промысловых рыб Белого моря с учетом рационального использования биологических ресурсов. Уловы пелагических и донных рыб подвержены значительной временной изменчивости. При этом рыбопромысловая отрасль Беломорья, как и ранее, имеет существенное значение для жизни населения прибрежных районов Белого моря. Специалисты отмечают [Дроздов и др., 2012; Стасенков, 2016; Тарвердиева и др., 2000], что установить закономерности, причины изменчивости объемов уловов промысловых рыб Белого моря с 1991 г. по настоящее время представляется затруднительным из-за недостатка продолжительных статистически достоверных данных об уловах. Лишь в последние годы отмечаются определенные положительные тенденции усиления внимания государства к освоению различных ресурсов Арктического региона местным населением [Куценко, 2018].

В работах [Дроздов и др., 2012; Состояние..., 2014; Филатов и др., 2014] исследуется влияние климатических факторов на рыболовство в Белом море. В работе [Дроздов и др., 2012] показано, что величины уловов основных промысловых рыб Белого моря демонстрируют статистически достоверную связь с динамикой показателей атмосферной циркуляции, которые в свою очередь оказывают определяющее влияние на температурный режим региона. При потеплении климата в регионе с запаздыванием от 2 до 4–5 лет отмечается увеличение уло-

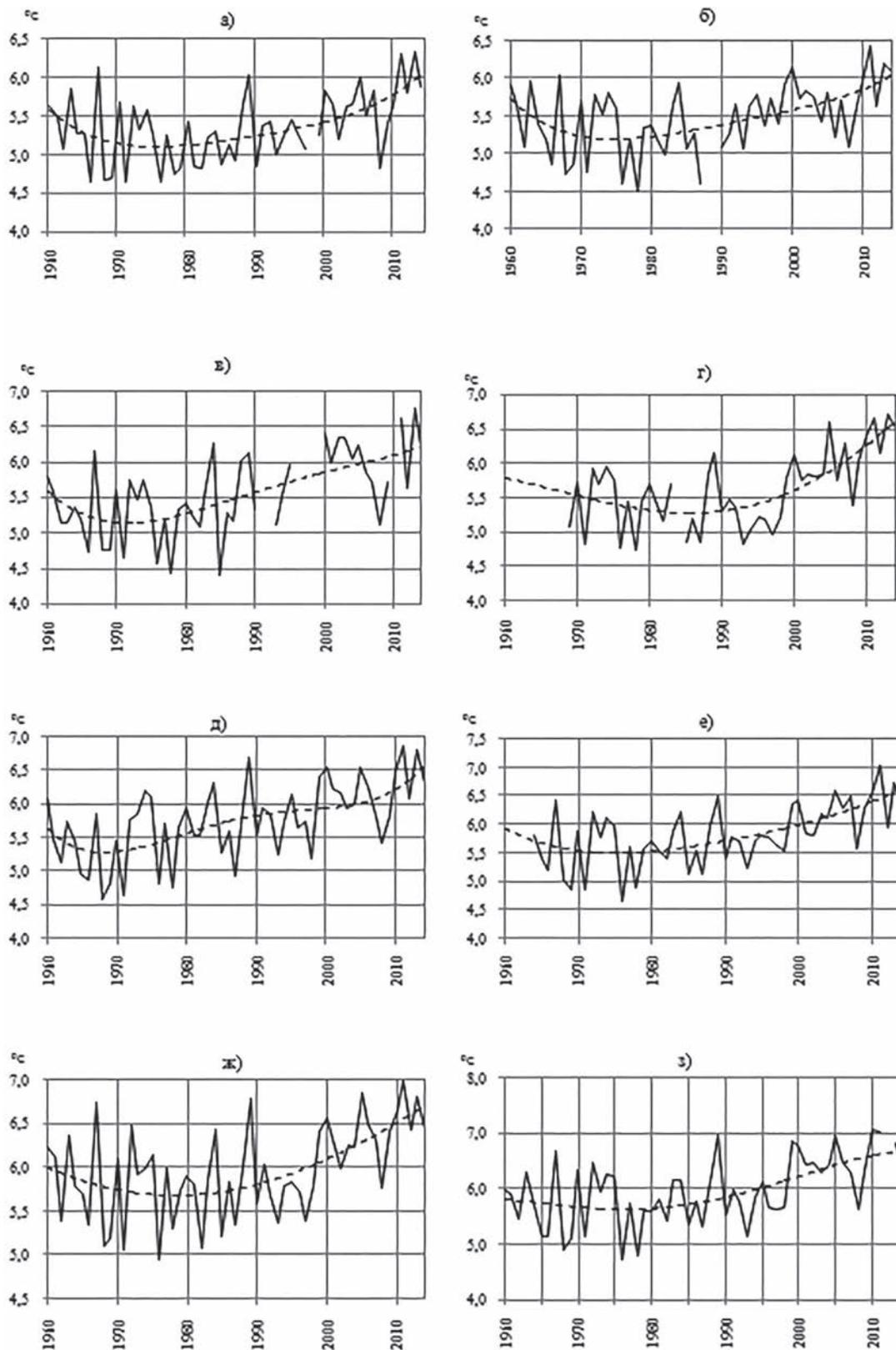


Рис. 8. Изменчивость среднегодовой температуры воды в поверхностном слое на реках Беломорья по данным наблюдений за 1960–2015 гг.:

а) Гридина, б) Кузема, в) Поньгома, г) Кемь, д) Шуя, е) Нижний Выг, ж) Сума, з) Нюхча

Fig. 8. Variability of the average annual water temperature in the surface layer of the White Sea rivers according to the observations in 1960–2015:

a) Gridina, б) Kuzema, в) Pongoma, г) Kem, д) Shuya, е) Lower Vyg, ж) Suma, з) Nyukhcha

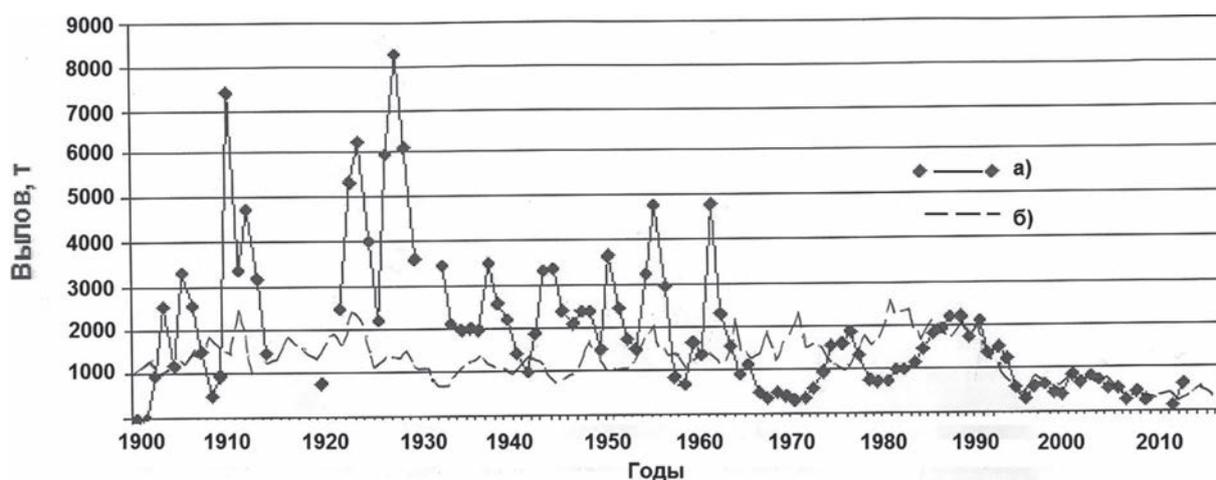


Рис. 9. Вылов сельди (а) и наваги (б) в Белом море с 1900 по 2013 г. (запас рассчитан на основании: до 1990 г. – фактических уловов, после 1990 г. – экспертных данных). По данным: [Стасенков, 2012, 2017]

Fig. 9. The catches of the herring (a) and navaga (b) in the White Sea from 1900 to 2013 (the stock was calculated on the basis of: before 1990 – actual catches, after 1990 – expert data). After: [Stasenkov et al., 2012, 2017]

ва рыб бореального происхождения – прежде всего сельдевых. Для промысловых холодлюбивых рыб арктического происхождения, среди которых навага и мойва, потепление сказывается на воспроизводстве и уловах неблагоприятно. А с середины 1990-х гг. уменьшение уловов объясняется не только климатическими причинами, но и неблагоприятными социально-экономическими условиями [Дроздов и др., 2012].

В настоящее время в Белом море промысловое значение имеют только примерно 10 видов рыб [Поморские..., 2011]. Основными объектами промысла являются пелагические рыбы, такие как навага, беломорская сельдь, корюшка, а также донные рыбы – треска, пинагор, полярная камбала и речная камбала. Запасы сельди испытывают резкие колебания [Тарвердиева и др., 2000; Стасенков, 2016] под влиянием циклических изменений как абиотических, так и биотических факторов среды, в первую очередь термического режима, наличия нерестового субстрата (зоостеры) и условий откорма (рис. 9, а).

Уловы сельди достигали максимальных значений в период Первой мировой войны (1914–1916 г.), в 30-х годах XX столетия во время интенсивного индустриального строительства, а также в 1960-х годах. При резком изменении экономики в 1991 г. резко упали уловы, которые с 1990 по 2012 г. сократились с 2000 до 143 т. Также сократилось число рыбаков при уменьшении населения рыбацких деревень к концу XX века в 6–8 раз [Стасенков, 2016]. Как видно из рис. 9, а и б, до начала 1990-х годов уловы наваги в Белом море были ниже уловов сельди, а после 1991 г. уловы этих рыб сопоставимы.

В начале 90-х годов XX в. практически по всем промысловым объектам произошло существенное снижение добычи при переходе на новые формы хозяйствования. Добыча многих объектов стала малорентабельной или убыточной. Число промысловых орудий при добыче наваги в Белом море сократилось, резко возросло браконьерство из-за новой системы хозяйствования, законодательной базы вылова (квоты, лицензии, сроки вылова) [Куценко, 2018]. Менее значительно сократился вылов в Онежском заливе, где на Карельском берегу места промысла располагаются в непосредственной близости от рынков сбыта и наиболее развита прибрежная транспортная инфраструктура.

По данным исследований [Чугайнова, 2014; Толстикова, 2016], в последние годы в Белом море наблюдается увеличение амплитуд межгодовой и сезонной изменчивости гидрометеорологических параметров. Это сказывается на особенностях изменений экосистем моря, что в дальнейшем повлияет на запасы донных и пелагических видов рыб [Дроздов и др., 2012; Чугайнова, 2014]. Из абиотических факторов наибольшее влияние на выловы рыб имеет изменчивость температуры воды. В целях выявления главной причины, воздействующей на скорость роста наваги Онежского и Двинского заливов, в качестве индикатора продолжительности сезона ее нагула в работе [Стасенков, 2016] была выбрана средняя температура поверхностного слоя воды в апреле, а индикатором, отражающим величину кормовой базы и доступность корма, – средняя температура воды за вегетационный период (май–сентябрь). Для наваги – рыбы арктического происхожде-

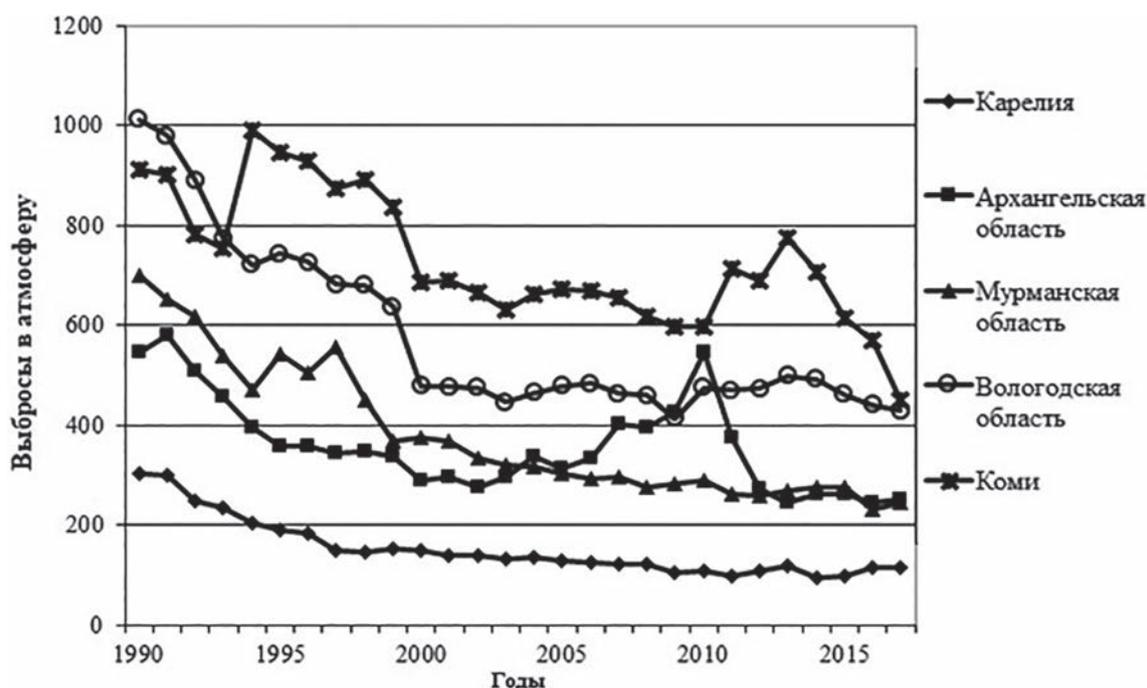


Рис. 10. Динамика выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников по регионам Беломорья (млн м<sup>3</sup>), по данным ФСГС

Fig. 10. Dynamics of pollutants emissions into the atmosphere from the stationary sources in the White Sea regions (mln m<sup>3</sup>) according to the Federal State Statistics Service

ния (условно холодолюбивой) – чрезмерный летний прогрев вод при потеплении климата в регионе неблагоприятно отражается на условиях откорма, т. к. ей приходится покидать мелководную прогреваемую зону моря с богатой кормовой базой и опускаться в более глубокие районы с низкими температурами воды и слабой кормовой базой [Стасенков, 2016].

В работах, посвященных улучшению ситуации с выловом рыб Белого моря и разработке мер по повышению промысловой продуктивности [Горнова, 2016; Стасенков, 2016; Фомин, 2016; Меншуткин и др., 2018], отмечается необходимость восстановления уровня воспроизводства, усиления борьбы с загрязнением, устранения препятствий на пути нерестовых миграций, создания и использования искусственных нерестовых субстратов и нерестилищ, мелиорации мест промысла макрофитов, интенсивного развития марикультуры, а также увеличения инвестиций в отрасль.

#### *О влиянии изменений экономики на состояние водосбора*

Ситуация с состоянием окружающей среды Беломорья заметно улучшилась в 1990-х годах за счет значительного спада производства, которое уменьшилось почти наполовину [Дружинин и др., 2017, 2018]. В период роста

экономики с 1999 г. уменьшение воздействия на окружающую среду продолжилось – например, выбросы в атмосферу от стационарных источников уменьшились за последние десять лет на 15 %. В результате объем выбросов в атмосферу на единицу продукции уменьшился относительно 1990 г. примерно в два раза в большинстве регионов. Сбросы загрязненных сточных вод уменьшились за десять лет немного больше, но ситуация в регионах разная.

Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу уменьшились во всех регионах (рис. 10). Наиболее заметное сокращение произошло в Мурманской области – в три раза и в Карелии – в 2,5 раза. В то же время в Республике Коми выбросы уменьшились лишь на треть, а поскольку объемы производства в регионе не достигли дореформенного уровня, то на единицу производства выбросы уменьшились лишь на пятую часть. Наибольшие выбросы в атмосферу – в небольших городах, промышленных центрах Воркуте, Усинске, Костомукше и Печенге. Отметим такую особенность структуры экономики северных регионов, как высокая доля добычи полезных ископаемых, металлургии, энергетики и производства бумаги, являющихся причиной значительных выбросов в атмосферу. Их величина на единицу продукции существенно превышает среднероссийский уровень.

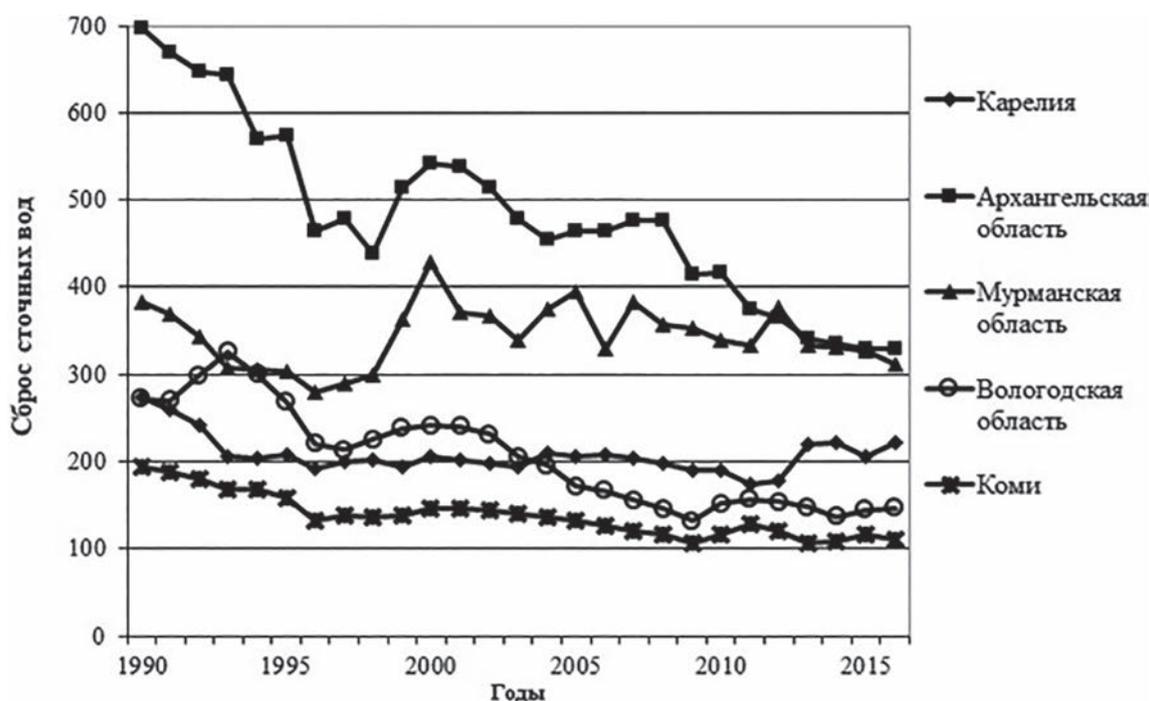


Рис. 11. Динамика сбросов загрязненных сточных вод по регионам Беломорья (млн м<sup>3</sup>), по данным ФСГС

Fig. 11. Dynamics of polluted wastewater discharges in the White Sea regions (mln m<sup>3</sup>) according to the Federal State Statistics Service

Спад экономики в начале 1990-х годов привел к значительному уменьшению сбросов загрязненных сточных вод, но с ростом экономики они снова стали увеличиваться, лишь с 2001 г. приход новых технологий привел к медленному улучшению ситуации (рис. 11). Примерно 2/3 сбросов загрязненных сточных вод приходится на два региона – Архангельскую и Мурманскую области, причем снижение сбросов в последнее десятилетие происходит только в Архангельской области. Соответственно, если в ней объем сбросов на единицу продукции снизился в два раза, то в других регионах он практически не уменьшился.

Водопотребление во всех регионах сокращается, более заметно в 1990-х годах, а в за 1990–2017 гг. оно уменьшилось почти в два раза. Анализ зависимости динамики загрязнений от изменения экономических показателей позволил выделить два периода – быстрый спад потребления воды при снижении валового национального продукта (ВВП) до 1999 г., а затем рост ВВП, который сопровождается небольшим снижением потребления воды. Аналогичные зависимости существуют и по двум другим показателям – выбросам в атмосферу и сбросам сточных вод (рис. 10, 11). Улучшение экологической ситуации в 1990-е годы происходило за счет спада экономики, а в 2000-х

годах – частично из-за изменения структуры экономики и природоохранных инвестиций, а в основном из-за модернизации экономики, роста инвестиций в новые современные производства. Фактически экономическое развитие регионов осуществлялось в эти годы на новой технологической основе, модернизировались действующие предприятия, строились новые на базе современных технологий, ускоренно развивалась сфера услуг. В результате происходило уменьшение воздействия на окружающую среду [Дружинин, 2014].

Среди секторов экономики последствия изменения климата в первую очередь заметны в сельском и лесном хозяйстве страны [Seo, 2013; Шкиперова, Дружинин, 2011]. Наши расчеты показали [Дружинин и др., 2018], что на водосборе Белого моря потепление приводит к росту урожайности большинства основных сельскохозяйственных культур, а также индексов производства, в отличие от более южных регионов ЕЧР. В то же время для лесного хозяйства и некоторых других отраслей потепление снижает доступность природных ресурсов и отрицательно сказывается на объемах производства. Ожидается, например, что потепление климата за последующие 30 лет приведет к увеличению продуктивности бореальных (таежных) лесов [Прокопьев, Рослякова, 2017].

Так, в Архангельской области прогнозируется увеличение радиальных приростов сосны, но при этом там же прогнозируется рост интенсивности усыхания ели. Бореальные леса будут расширяться на север и после 2050 г., заменяя до 50 % территории, занимаемой в настоящее время тундрой. В то же время потепление ведет к сокращению срока службы зимников и снижению доступности территорий, где лесозаготовки возможны только зимой, т. е. к экономическим потерям [Прокопьев, Рослякова, 2017]. Среди негативных эффектов изменения климата на лесное хозяйство отмечается проникновение новых лесных вредителей и болезней на территории с древостоями, не обладающими выработанными защитными механизмами [Королева и др., 2015]. Кроме лесного сектора к зависимым от погодных и климатических условий секторам экономики Российской Арктики относят добычу полезных ископаемых, энергетику, транспорт и туризм, которые в данный момент развиваются в Беломорье [Бугмырин и др., 2013; Назарова, 2017; Дружинин и др., 2018].

## Заключение

По данным многолетних наблюдений за основными параметрами и характеристиками климата показано существенное потепление климата на водосборе Белого моря за последние 30 лет. Начиная с 1989 года на этой территории преобладают положительные аномалии средней годовой температуры воздуха (1–2 °С). Наиболее интенсивное потепление отмечается в зимние месяцы, что сопровождается частым наступлением оттепелей при прохождении циклонов, сформировавшихся над Атлантикой. Усиление западного переноса и циклонической активности является причиной понижения атмосферного давления, особенно в холодный период года. Анализ изменений количества осадков в районе исследований показывает, что в целом наблюдается рост годовых сумм выпавших атмосферных осадков (в среднем на 40–80 мм за год). Высота снежного покрова и продолжительность его залегания в основном находятся в пределах климатических норм. При потеплении климата не обнаружено значительных изменений (отсутствует значимый тренд) среднегодового стока рек, но оказалось заметным повышение температуры воды рек и Белого моря, что должно отражаться на его экосистемах [Белое..., 2007].

Анализ данных показывает, что колебания годового стока для разных рек на водосборе различны по цикличности, направлению линии

трендов. Для большинства рек с 1950 по 2015 г. отмечено небольшое увеличение годового стока, а для таких рек, как Мезень, Сума, – его уменьшение. Изменения стока рек за последние десятилетия (после 1977 г.) по отношению к предыдущему периоду для всех водотоков незначительны (в пределах ошибки их оценки) и разнонаправлены.

Результаты исследования изменчивости среднегодовой температуры воды в поверхностном слое на реках Беломорья показывают ее постепенное уменьшение с 1960 по 1980 г., начиная с середины 1980-х годов при потеплении климата на водосборе – ее увеличение в среднем на 1 °С. Изменения температуры воды когерентны изменениям температуры воздуха на водосборах рассматриваемых рек (квадрат когерентности 0,80).

Наиболее низкие значения среднегодовой температуры воды Белого моря отмечались в середине 60-х и конце 70-х, а максимальные – в конце 80-х и середине 90-х годов XX в. Изменения температуры воды в придонном горизонте на глубине 65 м имеют заметный тренд, как и изменения температуры воздуха, за период с 1977 по 2008 г. В придонном горизонте отмечается увеличение температуры воды на 0,5 °С, что согласуется с тенденциями изменений климата.

С середины 1990-х годов уменьшение уловов в Белом море объясняется не только климатическими причинами, но и неблагоприятными социально-экономическими условиями [Дроздов и др., 2012; Фомин, 2016; Дружинин и др., 2018]. Последние 25–30 лет работа рыбопромышленной отрасли Беломорского региона подвержена весьма резким изменениям, происходящим из-за социально-экономических процессов и особенностей законодательства (лицензирование, квоты, запреты на вылов). Отмечается, что величины уловов основных промысловых рыб Белого моря демонстрируют статистически достоверную связь с изменениями климата, и в первую очередь с температурным режимом региона. При потеплении климата в регионе с запаздыванием на несколько лет отмечается увеличение улова рыб бореального происхождения – прежде всего сельдевых. Из абиотических факторов наибольшее влияние на выловы наваги и сельди – основных объектов промыслового лова – имеет температура воды. Потепление климата и повышение температуры воды в море неблагоприятно сказываются на продуктивности наваги – рыбы арктического происхождения, поскольку ей приходится покидать мелководную прогреваемую зону моря с богатой кормовой базой и опу-

скаются в более глубокие районы с низкими температурами воды и слабой кормовой базой.

По данным государственной статистики, по большинству показателей экологическая ситуация в Беломорье за последние 30 лет улучшалась. В 1990-е годы – за счет спада экономики, а в 2000-х годах – из-за изменения структуры экономики, а также инвестиций в модернизацию производств и природоохранные мероприятия.

Полученные выше данные используются для разработки когнитивной модели региона, включающей в себя оценку влияния рыболовства на проживание населения в условиях климатических изменений и разных сценариев развития экономики.

*Работа выполнена по гранту РФФИ «Арктика» № 18-05-60296.*

*Благодарим за помощь сотрудников ИВПС КарНЦ РАН А. П. Георгиева, А. В. Толстикова, А. Ф. Балаганского, В. А. Карпечко, В. Н. Коваленко, Н. И. Махальскую, а также сотрудников ИЭ КарНЦ РАН М. В. Морошкину, Г. Т. Шкиперову, А. Е. Курило, Е. А. Прокопьева.*

## Литература

*Арктические исследования: от экстенсивного освоения к комплексному развитию: материалы I международного молодежн. науч.-практ. конф. (26–28 апреля 2018). Т. 1.; Сев. (Арктич.) федер. ун-т. Архангельск: САФУ, 2018. 362 с.*

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

*Бергер В. Я. Продукционный потенциал Белого моря. Исследования фауны морей. СПб.: ЗИН РАН, 2007. Т. 60(68). 292 с.*

*Бугмырин С. В., Назарова Л. Е., Беспятова Л. А., Иешко Е. П. К вопросу о северной границе распространения *Ixodes persulcatus* (Acari: Ixodidae) в Карелии // Изв. РАН. Сер. биол. 2013. № 2. С. 240–244.*

*Георгиевский И. Ю. Водные ресурсы рек Российской Федерации // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: Труды Четвертой Всерос. науч. конф. с междунар. участием. М.: ИВП РАН, 2015. С. 5–8.*

*Горнова А. М. О состоянии рыболовства в арктических акваториях // Арктика и Север. 2016. № 25. С. 196–210.*

*Дроздов В. В., Смирнов Н. П., Косенко А. В. Многолетняя динамика уловов промысловых рыб Белого моря в зависимости от климатических колебаний и состояния рыбопромысловой отрасли // Уч. зап. РГГМУ. 2012. № 27. С. 148–164.*

*Дружинин П. В. Моделирование структуры промышленности по технологическим уровням // Друковский вестник. 2014. № 4. С. 41–51.*

*Дружинин П. В., Филатов Н. Н., Морошкина М. В., Дерусова О. В., Поташева О. В. Моделирование и пространственный анализ эколого-экономического состояния водосбора Белого моря // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2018. Т. 24, № 1. С. 297–309.*

*Дружинин П. В., Шкиперова Г. Т. Влияние природоохранной деятельности на состояние окружающей среды // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. 2017. № 12 (ч. 7). С. 805–809. URL: [https://docs.wixstatic.com/ugd/dcaed9\\_6cb77455ccd748c3bf882be13b157f4b.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/dcaed9_6cb77455ccd748c3bf882be13b157f4b.pdf) (дата обращения: 15.07.2019).*

*Королева Т. С., Константинов А. В., Шунькина Е. А. Угрозы и социально-экономические последствия изменения климата для лесного сектора // Труды СПбНИИЛХ. 2015. № 3. С. 55–71.*

*Куценко С. Ю. Развитие рыболовства на прибрежных территориях Арктической зоны РФ как фактор закрепления населения (на примере Архангельской области) // Вестник МФЮА. 2018. № 2. С. 200–217.*

*Лаженцев В. Н. Север России: альтернативы на будущее // Современные производительные силы. 2013. № 2. С. 115–124.*

*Меншуткин В. В., Филатов Н. Н., Дружинин П. В. Состояние и прогнозирование социо-эколого-экономической системы водосбора Белого моря с использованием когнитивного моделирования // Арктика. Экология. Экономика. 2018. № 2(30). С. 79–85. doi: 10.25283/2223-4594-2018-2-4-17.*

*Назарова Л. Е. Современные климатические условия водосбора Белого моря // Известия РГО. 2017. Т. 149, вып. 5. С. 16–24.*

*Охрана окружающей среды в России. 2018: Стат. сб. М.: Росстат, 2018. 125 с.*

*Поморские рыбные промыслы / Отв. ред. В. А. Стасенков. Архангельск: СевПИНРО, 2011. 264 с.*

*Прокопьев Е. А., Рослякова Н. А. Оценка влияния изменения климата на экономику Севера (обзор литературы) // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2017. № 10. С. 8.*

*Рябова Л. А., Ключникова Е. М. Социальные последствия изменения климата в российской Арктике: изученность проблемы и задачи новых исследований // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2018. № 3. С. 91–111.*

*Состояние арктических морей и территорий в условиях изменения климата: сб. тезисов Всерос. конф. с междунар. участием / Сост. С. В. Рябченко; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М. В. Ломоносова. Архангельск: ИД САФУ, 2014. 199 с.*

*Стасенков В. А. Многолетняя динамика биологических показателей наваги *Eleginus nawaga* (Walbaum, 1792) Белого моря в связи с изменениями температурного режима водоема // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2017. Т. 20, № 2. С. 370–380.*

*Стасенков В. А. Навага // Биологические ресурсы Белого моря: изучение и использование / Ред. Н. В. Аржанова, О. Н. Пугачев. СПб.: ЗИН РАН, 2012. С. 164–173.*

Стасенков В. А. О промысле наваги // Вестник рыбохозяйственной науки. 2016. Т. 3. № 2(10). С. 18–26.

Татаркин А. И., Логинов В. Г. Оценка природно-ресурсного и производственного потенциала северных и арктических районов: состояние и перспективы использования // Проблемы прогнозирования. 2015. № 1. С. 33–44.

Тарвердиева М. И., Подражанская С. Г., Гнетнева Л. В. Питание сельди (*Clupea harengus maris-albi* Berg) в разных районах Белого моря // Морские гидробиологические исследования (Сб. науч. трудов). М.: ВНИРО, 2000. С. 170–185.

Толстикова А. В. Изменчивость температуры поверхностного слоя Белого моря. М.: ГЕОС, 2016. 212 с.

Толстикова А. В., Филатов Н. Н., Богданова М. С., Литвиненко А. В., Карпечко В. А., Дерусова О. В., Балаганский А. Ф. Электронный атлас Белого моря и его водосбора // Реестр баз данных. Рег. номер: 2017620252. Дата регистрации: 20170301. Номер заявки: 2016621480. Дата подачи заявки: 20161107.

Толстикова А. В., Чернов И. А., Мартынова Д. М. Решение проблемы необходимых данных для численного моделирования процессов в Белом море в интересах развития арктической зоны Российской Федерации // Арктика: экология и экономика. 2018. № 2(30). С. 45–55. doi: 10.25283/2223-4594-2018-2-45-55

Федеральный закон «О стратегическом планировании в Российской Федерации» от 28 июня 2014 года № 172-ФЗ с учетом приказа Минэкономразвития России от 23 марта 2017 № 132 // Законодательство РФ: Сб. основных федеральных законов РФ [Электронный ресурс]. URL: <https://fzrf.su/zakon/o-strategicheskom-planirovanii-172-fz/> (дата обращения: 15.07.2019).

Филатов Н. Н. Опыт информационного обеспечения регионов Севера РФ о состоянии и изменениях водных объектов и водосборов под влиянием климатических и антропогенных факторов // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2017. № 23. С. 130–142. doi: 10.24057/2414-9179-2017-1-23-130-142

Филатов Н. Н., Толстикова А. В., Богданова М. С., Литвиненко А. В., Меньшуткин В. В. Создание инфор-

мационной системы и электронного атласа по состоянию и использованию ресурсов Белого моря и его водосбора // Арктика: экология и экономика. 2014. № 3(15). С. 18–29.

Фомин А. В. Есть ли будущее у рыбной отрасли // Состояние и перспективы развития рыбной промышленности Северного бассейна в меняющихся условиях: Сб. материалов V науч.-практ. конф. (Мурманск, 19 января 2016 г.). Мурманск: Изд-во МГТУ, 2016. 229 с.

Чернов И. А., Толстикова А. В., Яковлев Н. Г. Комплексная модель Белого моря: гидротермодинамика вод и морского льда // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 8. С. 116–128. doi: 10.17076/mat397

Чугайнова В. А. Сезонная и межгодовая изменчивость океанологических условий Белого моря в 2001–2013 гг. // Состояние арктических морей и территорий в условиях изменения климата: сб. тезисов Всерос. конф. с междунар. участием / Сост. С. В. Рябченко; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М. В. Ломоносова. Архангельск: ИД САФУ, 2014. С. 31–33.

Шкиперова Г. Т., Дружинин П. В. Оценка влияния развития экономики территории на окружающую среду (на примере Республики Карелия) // Экология промышленного производства. 2011. № 4. С. 15–19.

IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of working groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland. 151 p.

Lee C., Schlemme C., Murray J., Unsworth R. The cost of climate change: Ecosystem services and wildland fires // Ecol. Econ. 2015. Vol. 116. P. 261–269.

Petrov A. N., BurnSilver S., Chapin III F. S., Fondahl G., Graybill J. K., Keil K., Nilsson A. E., Riedlsperger R., Schweitzer P. Arctic sustainability research: Past, present and future. Routledge, 2017. 110 p.

Seo S. N. An essay on the impact of climate change on US agriculture: weather fluctuations, climatic shifts, and adaptation strategies // Climatic Change. 2013. No. 121(2). P. 115–124.

Поступила в редакцию 01.08.2019

## References

Arkticheskie issledovaniya: ot ekstensivnogo osvoeniya k kompleksnomu razvitiyu: mat. I mezhdunar. molo-dezhn. nauch.-prakt. konf. (26–28 aprelya 2018 g.) [Study of the Arctic: from extensive reclamation to complex development: Proceed. I int. youth sci.-pract. conf. (April 26–28, 2018)]. Vol. 1.; Sev. (Arktich.) feder. un-t. Arkhangel'sk, 2018. 362 p.

Beloe more i ego vodosbor pod vliyaniem klimaticheskikh i antropogennykh faktorov [The White Sea and its catchment under climatic and man-induced impact]. Eds. N. N. Filatov, A. Yu. Terzhevnik. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2007. 335 p.

Berger V. Ya. Produktsionnyi potentsial Belogo morya. Issledovaniya fauny morei [Productional potential of the White Sea. Study of sea fauna]. St. Petersburg: ZIN RAN, 2007. Vol. 60(68). 292 p.

Bugmyrin S. V., Nazarova L. E., Bespyatova L. A., Ieshko E. P. K voprosu o severnoi granitse rasprostraneniya *Ixodes persulcatus* (Acari: Ixodidae) v Karelii [Concerning the problem of the northern limit of *Ixodes persulcatus* (Acari: Ixodidae) distribution in Karelia]. *Izv. RAN. Ser. biol.* [Biol. Bull.]. 2013. No. 2. P. 240–244.

Chernov I. A., Tolstikov A. V., Yakovlev N. G. Kompleksnaya model' Belogo morya: gidrotermodynamika vod i morskogo l'da [Comprehensive model of the White Sea: hydrothermodynamics of water and sea ice]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2016. No. 8. P. 116–128. doi: 10.17076/mat397

Chugainova V. A. Sezonnaya i mezhgodovaya izmenchivost' okeanologicheskikh uslovii Belogo morya v 2001–2013 gg. [Seasonal and interannual variability of oceanologic conditions of the White Sea

in 2001–2013]. *Sostoyanie arkticheskikh morei i territorii v usloviyakh izmeneniya klimata*: sb. tezisov vseross. konf. s mezhdunar. uchastiem [State of the Arctic oceans and territories under climate change conditions: Abs. All-Russ. conf. with int. part.]. Ed. S. V. Ryabchenko; Sev. (Arktich.) feder. un-t im. M. V. Lomonosova. Arhangel'sk: SAFU, 2014. P. 31–33.

Drozhdov V. V., Smirnov N. P., Kosenko A. V. Mno-goletnyaya dinamika ulovov promyslovykh ryb Belogo morya v zavisimosti ot klimaticheskikh kolebanii i so-stoyaniya rybopromyslovoi otrasli [Long-term variability of stocks of the food fishes in the White Sea under the influence on climatic changes and fishery branch activity]. *Uch. zap. RGGMU* [Proceed. RSHU]. 2012. No. 27. P. 148–164.

Druzhinin P. V. Modelirovanie struktury promyshlennosti po tekhnologicheskim urovniam [Modeling the structure of industry in the technological level]. *Drukerovskii vestnik* [Drukerovskij vestnik]. 2014. No. 4. P. 41–51.

Druzhinin P. V., Filatov N. N., Moroshkina M. V., Derusova O. V., Potasheva O. V. Modelirovanie i pro-stranstvennyi analiz ekologo-ekonomicheskogo so-stoyaniya vodosbora Belogo morya [Modeling and dimensional analysis of ecological and economical state of the White Sea catchment]. *InterKarto. InterGIS*. 2018. Vol. 24, no. 1. P. 297–309.

Druzhinin P. V., Shkiperova G. T. Vliyanie prirodokhrannoi deyatel'nosti na sostoyanie okruzhayushchei sredy [The impact of environmental activities on the state of the environment]. *Konkurentosposobnost' v global'nom mire: ekonomika, nauka, tekhnologii* [Competitiveness in the global world: economics, science, technology]. 2017. No. 12, pt. 7. P. 805–809. URL: [https://docs.wixstatic.com/ugd/dcaed9\\_6cb77455ccd-748c3bf882be13b157f4b.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/dcaed9_6cb77455ccd-748c3bf882be13b157f4b.pdf) (accessed: 15.07.2019).

Federal'nyi zakon "O strategicheskoy planirovani v Rossiiskoi Federatsii" ot 28 iyunya 2014 goda № 172-FZ s uchetom prikaza Minekonomrazvitiya Rossii ot 23 marta 2017 N 132 [The Federal law No. 172-FZ On strategic planning in the Russian Federation dated 28.06.2014 in accordance with the Order No. 132 of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation dated 23.03.2017]. *Zakonodatel'stvo RF: Sb. osnovnykh federal'nykh zakonov RF* [Legislation of the Russian Federation: Collection of the main federal laws of the RF]. URL: <https://fzrf.su/zakon/o-strategicheskoy-planirovani-172-fz/> (accessed: 15.07.2019).

Filatov N. N., Tolstikov A. V., Bogdanova M. S., Litvinenko A. V., Menshutkin V. V. Sozdanie informatsionnoi sistemy i elektronnoy atlasy po sostoyaniyu i ispol'zovaniyu resursov Belogo morya i ego vodosbora [Development of information system and electronic atlas on the status and use of resources of the White Sea and its catchment]. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: Ecology and Economy]. 2014. No. 3(15). P. 18–29.

Filatov N. N. Opyt informatsionnogo obespecheniya regionov Severa RF o sostoyanii i izmeneniyakh vodnykh ob'ektov i vodosborov pod vliyaniem klimaticheskikh i antropogennykh faktorov [Dataware of regions of the North of the Russian Federation on the state and changes of water bodies and catchments under

the influence of climatic and man-induced impact]. *InterKarto. InterGIS*. 2017. Vol. 23. P. 130–142. doi: 10.24057/2414-9179-2017-1-23-130-142

Fomin A. V. Est' li budushchee u rybnoi otrasli [Does fishing industry have future?]. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya rybnoi promyshlennosti Severnogo basseina v menyayushchikhsya usloviyakh*: Sb. mat. V nauch.-prakt. konf. (Murmansk, 19 yanvarya 2016 g.) [State and prospects of fishing industry development in the Northern basin under changing conditions: Proceed. V sci.-pract. conf. (Murmansk, Jan. 19, 2016)]. Murmansk: Izd-vo MGTU, 2016. 229 p.

Georgievskii I. Yu. Vodnye resursy rek Rossiiskoi Federatsii [Water resources of rivers in the Russian Federation]. *Fund. probl. vody i vodnykh resursov*: Trudy Chetvertoi Vseros. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem [Fund. issues of water and water resources: Proceed. 4<sup>th</sup> All-Russ. sci. conf. with int. part.]. Moscow: IVP RAN, 2015. P. 5–8.

Gornova A. M. O sostoyanii rybolovstva v arkticheskikh akvatoriyakh [On the state of fishery in the Arctic water areas]. *Arktika i Sever* [Arctic and North]. 2016. No. 25. P. 196–210.

Koroleva T. S., Konstantinov A. V., Shun'kina E. A. Ugrozy i sotsial'no-ekonomicheskie posledstviya izmeneniya klimata dlya lesnogo sektora [Threats and socio-economic consequences of climate change for the forest sector]. *Trudy SPbNILKh* [Proceed. St. Petersburg Forestry Research Inst.]. 2015. No. 3. P. 55–71.

Kutsenko S. Yu. Razvitie rybolovstva na pribrezhnykh territoriyakh Arkticheskoi Zony RF kak faktor zakrepleniya naseleniya (na primere Arhangel'skoi oblasti) [Development of fishery on the coastal territories of the Arctic Zone of the Russian Federation as a factor of consolidating population (case of the Arkhangelsk Region)]. *Vestnik MFYuA* [Herald of MUFL]. 2018. No. 2. P. 200–217.

Lazhentsev V. N. Sever Rossii: al'ternativy na budushee [North of Russia: alternative prospects]. *Sovr. proizvoditel'nye sily* [Current Productive Forces]. 2013. No. 2. P. 115–124.

Menshutkin V. V., Filatov N. N., Druzhinin P. V. Sostoyanie i prognozirovaniye sotsio-ekologo-ekonomicheskoi sistemy vodosbora Belogo morya s ispol'zovaniem kognitivnogo modelirovaniya [The current state and forecasting of the socio-ecological-economic system of the White Sea watershed with the use of cognitive simulation]. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: Ecology and Economy]. 2018. No. 2(30). P. 79–85. doi: 10.25283/2223-4594-2018-2-4-17

Nazarova L. E. Sovremennyye klimaticheskie usloviya vodosbora Belogo morya [Current climatic conditions of the White Sea catchment]. *Izv. RGO* [The RGS Herald]. 2017. Vol. 149, iss. 5. P. 16–24.

Okhrana okruzhayushchei sredy v Rossii [Environmental protection]. 2018: Stat. coll. Moscow: Rosstat, 2018. 125 p.

Pomorskie rybnye promysly [Pomor fishery]. Ed. V. A. Stasenkov. Arhangel'sk: SevPINRO, 2011. 264 p.

Prokop'ev E. A., Roslyakova N. A. Otsenka vliyaniya izmeneniya klimata na ekonomiku Severa (obzor literatury) [Assessment of climate change impact on the North economics (a literature review)]. *Upravlenie ekonomicheskimi sistemami: elektronnyi nauch. zhurn.* [Man-

agement of Economic Systems: Electronic Sci. J.]. 2017. No. 10. P. 8.

Ryabova L. A., Klyuchnikova E. M. Sotsial'nye posledstviya izmeneniya klimata v rossiiskoi Arktike: izuchennost' problemy i zadachi novykh issledovaniy [Social consequences of climate change in the Russian Arctic: Background knowledge of the problem and the agenda for new research]. *Sever i rynek: formirovaniye ekonomicheskogo poryadka* [The North and the Market: Forming the Economic Order]. 2018. No. 3. P. 91–111.

Shkiperova G. T., Druzhinin P. V. Otsenka vliyaniya razvitiya ekonomiki territorii na okruzhayushchuyu sredu (na primere Respubliki Kareliya) [Assessment of economics development impact on the environment (the case of the Republic of Karelia)]. *Ekol. promyshl. proizvodstva* [Ecol. of comm. production]. 2011. No. 4. P. 15–19.

Sostoyaniye arkticheskikh morei i territorii v usloviyakh izmeneniya klimata: sb. tezisov vsereoss. konf. s mezhdunar. uchastiem [State of the Arctic seas and territories under climate change: Abs. All-Russ. conf. with int. part.]. Ed. S. V. Ryabchenko; Sev. (Arktich.) feder. un-t im. M. V. Lomonosova. Arhangel'sk: SAFU, 2014. 199 p.

Stasenkov V. A. O promysle navagi [On navaga fishing]. *Vestnik rybokhozyaistvennoi nauki* [The Bull. of Fisheries Sci.]. 2016. Vol. 3, no. 2(10). P. 18–26.

Stasenkov V. A. Navaga [The navaga]. *Biol. resursy Belogo morya: izuchenie i ispol'zovanie* [Biol. resources of the White Sea: study and use]. St. Petersburg: ZIN RAN, 2012. P. 164–173.

Stasenkov V. A. Mnogoletnyaya dinamika biologicheskikh pokazatelei navagi *Eleginus nawaga* (Walbaum, 1792) Belogo morya v svyazi s izmeneniyami temperaturnogo rezhima vodoema [Long-term dynamics of biological indicators of navaga *Eleginus nawaga* (Walbaum, 1792) of the White Sea in relation to changes of the reservoir temperature regime]. *Vestnik Murmanskogo gos. tekhn. un-ta* [MSTU Vestnik]. 2017. Vol. 20, no. 2. P. 370–380.

Tatarkin A. I., Loginov V. G. Otsenka prirodno-resursnogo i proizvodstvennogo potentsiala severnykh i arkticheskikh raionov: sostoyaniye i perspektivy ispol'zovaniya [Estimation of potential for natural resources and production in northern and Arctic areas: Conditions and prospects for use]. *Probl. prognozirovaniya* [Studies on Russ. Economic Development]. 2015. No. 1. P. 33–44.

Tarverdieva M. I., Podrazhanskaya S. G., Gnetneva L. V. Pitaniye sel'di (*Clupea harengus maris-albi* Berg) v raznykh raionakh Belogo morya [Herring (*Clupea harengus maris-albi* Berg) feeding in different areas of the White Sea]. *Morskije gidrobiol. issled.* (Sb. nauch. trudov) [Marine Research (Proceed.)]. Moscow: VNIRO, 2000. P. 170–185.

Tolstikov A. V. Izmenchivost' temperatury poverkhnostnogo sloya Belogo morya [Variability of the surface layer temperature in the White Sea]. Moscow: GEOS, 2016. 212 p.

Tolstikov A. V., Chernov I. A., Martynova D. M. Resheniye problemy neobkhodimykh dannykh dlya chislennogo modelirovaniya protsessov v Belom more v interesakh razvitiya arkticheskoi zony Rossiiskoi Federatsii [Sources of data for numerical simulation of the White Sea for developing the Russian Arctic area]. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [The Arctic: Ecology and Economy]. 2018. No. 2(30). P. 45–55. doi: 10.25283/2223-4594-2018-2-45-55

Tolstikov A. V., Filatov N. N., Bogdanova M. S., Litvinenko A. V., Karpechko V. A., Derusova O. V., Balaganskii A. F. Elektronnyi atlas Belogo morya i ego vodosbora [Electronic atlas of the White Sea and its catchment]. *Reestr baz dannykh* [Databases register]. Filing number: 2017620252. Registration date: 20170301. Application number: 2016621480. Application date: 20161107.

IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of working groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. 151 p.

Lee C., Schlemme C., Murray J., Unsworth R. The cost of climate change: Ecosystem services and wildland fires. *Ecol. Econ.* 2015. Vol. 116. P. 261–269.

Petrov A. N., BurnSilver S., Chapin III F. S., Fondahl G., Graybill J. K., Keil K., Nilsson A. E., Riedlsperger R., Schweitzer P. Arctic sustainability research: Past, present and future. Routledge, 2017. 110 p.

Seo S. N. An essay on the impact of climate change on US agriculture: weather fluctuations, climatic shifts, and adaptation strategies. *Climatic Change*. 2013. No. 121(2). P. 115–124.

Received August 01, 2019

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Филатов Николай Николаевич**  
директор ИВПС КарНЦ РАН, чл.-корр. РАН,  
д. г. н., проф.  
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185030  
эл. почта: nfilatov@rambler.ru

## CONTRIBUTORS:

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

**Назарова Лариса Евгеньевна**

заместитель директора ИВПС КарНЦ РАН, 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: nazarova@nwpi.krc.karelia.ru

**Дружинин Павел Васильевич**

ведущий научный сотрудник, руководитель отдела  
моделирования и прогнозирования регионального  
развития, д. э. н.  
Институт экономики КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185030  
эл. почта: pdruzhinin@mail.ru  
тел.: (8142) 571525

**Nazarova, Larisa**

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

**Druzhinin, Pavel**

Institute of Economics, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
50 Al. Nevsky Pr., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: pdruzhinin@mail.ru  
tel.: (8142) 571525

## ГИДРОХИМИЯ И ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

УДК 556.555.8:504.4.054

### МЕТОД КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

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

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

В системе мониторинга поверхностных вод РФ отсутствуют критерии оценки качества донных отложений, что осложняет выявление и прогнозирование развития процессов, негативно влияющих на качество воды, а также решение целого ряда задач, связанных с обеспечением государственного контроля и надзора за использованием и охраной водных объектов. В результате информация о содержании загрязняющих веществ в донных отложениях представляет собой обширный свод количественных данных, практическое приложение которых для диагностики экологического состояния водного объекта крайне затруднительно. В статье анализируется возможность применения алгоритма расчета удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ) для комплексной оценки загрязненности донных отложений на примере тяжелых металлов. Предлагаемая система формализованных показателей использует частотные характеристики рядов данных о содержании валовых и подвижных форм металлов в отложениях, балльную оценку этих характеристик, обобщение балльных оценок и приведение их к соответствующим классам чистоты, аналогично РД 52.24.643–2002, но с учетом закономерностей и особенностей накопления загрязняющих веществ в составе отложений. В качестве комплексных показателей предлагаются «удельный комбинаторный индекс загрязненности» (УКИЗДО), «класс качества» и «степень загрязненности» донных отложений. Оценочная шкала формируется с учетом класса опасности тяжелых металлов, а также реально наблюдаемых диапазонов их концентраций в донных отложениях. Границами шкалы служат осредненные частотные характеристики вариационных рядов содержаний тяжелых металлов в пробах отложений, отнесенные к их медиане. Уровень загрязненности донных отложений оценивается относительной характеристикой, рассчитанной сопоставлением фактических концентраций с региональными фоновыми. Неоднородность гранулометрического состава донных отложений в алгоритме расчета УКИЗДО корректирует расчет интегрального показателя с помощью соответствующих коэффициентов. Шкала качества донных отложений содержит 5 классов и 9 разрядов чистоты донных отложений – от «чистых» 1 класса до «экстремально грязных» 5 класса. Расчет УКИЗДО для озер Республики Татарстан с различным уровнем антропогенной нагрузки показал хорошую сходимостью полученных результатов с аналогичными подходами, оперирующими методами вероятностной статистики. Оптимальный результат при

сопоставлении классов загрязнения воды и донных отложений получен на основании определения в них подвижных форм металлов. Оценка валовых форм металлов в составе отложений характеризует риски и тенденции состояния водного объекта в перспективе при сохранении текущей нагрузки.

**Ключевые слова:** качество донных отложений; загрязнение; тяжелые металлы; удельный комбинаторный индекс загрязненности.

## **V. S. Valiev, D. V. Ivanov, R. R. Shagidullin. A METHOD FOR INTEGRATED ASSESSMENT OF SEDIMENT POLLUTION**

The system for surface waters monitoring in the Russian Federation lacks criteria for assessing the quality of bottom sediments, which makes it difficult to identify and predict the development of processes affecting water quality, and to handle quite a number of tasks related to state control and surveillance of the use and protection of water bodies. As a result, information on the content of pollutants in sediments appears as a massive body of quantitative data whose practical application for the diagnosis of the ecological state of a water body is extremely difficult. The article analyzes the possibility of applying an algorithm for calculating the specific combinatorial water pollution index (SCWPI) for a comprehensive assessment of sediments pollution, for example, with heavy metals. The proposed system of formalized indicators uses frequency characteristics of data series on the content of total and labile forms of metals in sediments, scoring of these characteristics, synthesis of the scores and their conversion to pollution/cleanliness classes, similarly to the procedure in the guidelines RD 52.24.643–2002, but taking into account sediment-specific patterns and features of pollutant accumulation. The “specific combinatorial sediment pollution index” (SCSPI), the “quality class” and “pollution degree” of sediments are proposed as integral indicators. The scoring scale is formed with regard to the hazard class of heavy metals, as well as the actually observed ranges of their concentrations in sediments. The boundaries of the scale are the averaged frequency characteristics of the variation series of heavy metal content in sediment samples relative to their median. The contamination level of sediments is estimated by a relative characteristic calculated by comparing actual concentrations with the regional background. Corrections by means of special coefficients are introduced to the SCSPI calculation algorithm to account for the heterogeneity of the particle size composition of sediments. The scale for the quality of bottom sediments is divided into 9 classes and orders of pollution/cleanliness, ranging from “unpolluted” (class 1) to “extremely polluted” (class 5). The calculation of SCSPI for lakes of the Republic of Tatarstan with different levels of anthropogenic load showed good convergence of the results with similar approaches based on probabilistic statistics methods. An optimal result when comparing the pollution classes of water and sediments was obtained from determinations of active forms of metals in them. The estimates of gross metal contents in sediments are indicative of the threats and trends in the state of the water body for the future, if the load remains at the current level.

**Keywords:** sediments quality; pollution; heavy metals; specific combinatorial index of pollution.

### **Введение**

Донные отложения (ДО) являются важнейшим компонентом водных экосистем, во многом обеспечивающим их состояние. Особенностью ДО как объекта мониторинга является то, что их структурный и химический состав интегрирует геохимические особенности водосборных территорий, техногенных сбросов и гидрохимию водных объектов. Кроме того, являясь продуктом седиментации неорганического и органического материала, ДО сами иг-

рают значительную роль в формировании качества поверхностных вод, в связи с чем оценка степени загрязненности водоемов и водотоков предполагает не только определение качества их водной среды, но и обобщенную характеристику ДО.

В рамках государственной системы мониторинга окружающей среды в РФ предусмотрено проведение наблюдений за загрязнением ДО поверхностных водных объектов [РД 52.24.609–2013]. Однако при этом отсутствуют четкие критерии качества ДО, нет алгоритма

оценок, формализующих в единый показатель весь спектр содержащихся в них загрязняющих веществ. Проблема осложняется разнообразием состава и особенностями структуры ДО, которые тем не менее детерминированы двумя главными факторами: гранулометрическим составом и содержанием органического вещества [Forstner, Wittmann, 1983; Muller et al., 2001; Томилина, Комов, 2002]. Эти факторы формируют матрицу, обеспечивающую депонирующие свойства ДО, что крайне важно учитывать при оценке состояния водного объекта в целом.

Важным элементом интегральной оценки качества ДО является выработка алгоритма ее формализации. Подобный алгоритм был реализован для определения качества поверхностных вод в виде расчета удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ) [РД 52.24.643–2002]. В основе этой схемы лежит оценка относительной характеристики, рассчитанной по реальным концентрациям совокупности загрязняющих веществ и соответствующим им ПДК. Оценка основана на агрегировании информации о частотах обнаружения концентраций, превышающих ПДК, и кратностях этого превышения. Сочетание уровня загрязненности воды и частоты обнаружения этих случаев позволяет получить комплексную характеристику, обобщающую целый ряд показателей в виде того или иного класса чистоты.

Методология вероятностных характеристик, лежащая в основе расчета УКИЗВ, является универсальной, что позволяет адаптировать этот метод применительно к ДО. Цель данной статьи – апробация алгоритма оценки загрязненности ДО на основе подходов, используемых при комплексной оценке качества поверхностных вод.

## Материалы и методы

Метод комплексной оценки загрязненности ДО должен решать задачу интегральной оценки их качества по комплексу приоритетных загрязняющих веществ, в первую очередь тяжелых металлов (ТМ).

Материалом для исследования явились результаты определения содержания ТМ (Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Zn, Cr, Mn) и железа в ДО озер Республики Татарстан (РТ) ( $n = 525$ ). Пробы поверхностных ДО отбирались в профундали озер при помощи лота с храпцом и дночерпателя ДЧ-0.025, для отбора кернов отложений использовались трубки ГОИН-1 и ГОИН-1.5.

Оценивалось содержание подвижных (эти формы экстрагировались из образцов ацетат-

но-аммонийным буфером с  $pH = 4,8$ ) и валовых (общий пул элементов, извлекаемых из образцов ДО  $5n HNO_3$ ) форм металлов. При учете гранулометрического состава отложений принималась во внимание доля в них пелитовых фракций ( $< 0,01$  мм). В качестве пороговых концентраций использовались данные о региональном фоновом содержании ТМ и Fe в ДО.

## Результаты и обсуждение

Предлагаемая нами система формализованных показателей использует частотные характеристики рядов данных о содержании отдельных ТМ в ДО, балльную оценку этих характеристик, обобщение балльных оценок и приведение их к соответствующим классам чистоты, аналогично РД 52.24.643–2002, но с учетом закономерностей и особенностей накопления загрязняющих веществ в ДО. Комплексными показателями качества ДО, в соответствии с предлагаемой методикой, являются удельный комбинаторный индекс загрязненности ДО (УКИЗДО), класс качества ДО и степень загрязненности ДО.

Уровень загрязненности ДО оценивается относительной характеристикой, рассчитанной сопоставлением фактических концентраций и соответствующих им фоновых значений (региональных нормативов), при этом аддитивность действия различных металлов, при их одновременном присутствии, так же как и в расчете УКИЗВ, реализована суммированием отдельных показателей, оценивающих вклад каждого из них. Помимо идентичной системы формализации оцениваемых параметров УКИЗВ и УКИЗДО для совместимости обеих оценок применена аналогичная градация классов чистоты, реализованная в виде пяти основных и трех дополняющих градаций:  $<1$ ,  $1-10$ ,  $10-30$ ,  $30-50$ ,  $>50$  с градацией баллов от 0 до 4. При этом вместо линейной интерполяции при балльной оценке использована нелинейная (полиномиальная и логарифмическая), более точно охватывающая разбивку диапазонов  $S_a$  и  $S_b$  (рис. 1 и 2).

Методика расчета УКИЗВ оставляет возможность опционально задавать градации в зависимости от природы и классов опасности рассматриваемых веществ.

Другим отличием метода расчета УКИЗДО является трансформированная шкала показателя комплексности  $S_b$ , оценивающего кратность превышений нормативных значений. Реализованная в методике расчета УКИЗВ шкала балльных оценок  $S_b$  при экстраполяции на ДО выглядела бы слишком растянутой. Так, част-

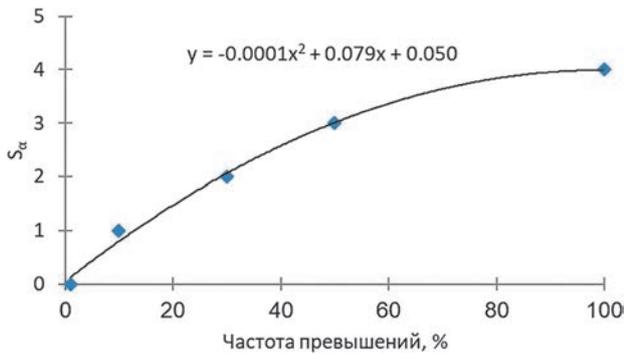


Рис. 1. Полиномиальная зависимость балльной оценки  $S_a$  от частоты превышений фонового содержания ТМ в ДО

Fig. 1. Polynomial dependence of the scoring  $S_a$  on the frequency of exceeding the background heavy metals content in sediments

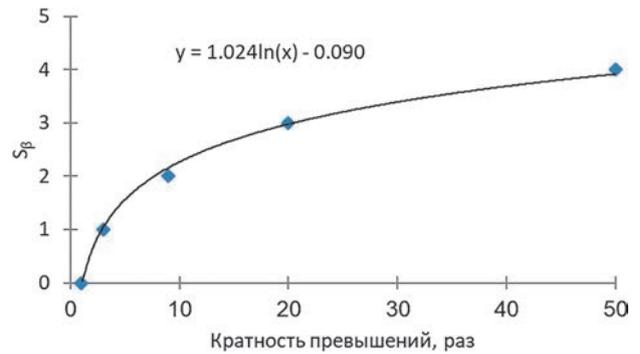


Рис. 2. Логарифмическая зависимость балльной оценки  $S_b$  от кратности превышений фонового содержания ТМ в ДО

Fig. 2. The logarithmic dependence of the scoring  $S_b$  on the multiplicity of exceeding the background heavy metals content in sediments

ному оценочному баллу  $S_b = 3$  при комплексной оценке качества вод соответствует 50-кратное превышение порогового значения (рис. 2). При оценке же содержания загрязняющих веществ в ДО озер указанная величина оценочного балла соответствует 20-кратному превышению норматива.

В связи с тем, что качество ДО оценивается относительно фоновых значений, оценочная шкала была сформирована с учетом и класса опасности ТМ, и реально наблюдаемых диапазонов их концентраций в ДО. Границами шкалы послужили осредненные частотные характеристики вариационных рядов содержаний ТМ во всех рассматриваемых образцах ДО, отнесенных к их медиане. При этом шкала изменяется от 0 баллов (при концентрациях меньше медианы, т. е. при отсутствии превышения) до величины отношений максимальных значений 95%-го доверительного интервала, наблюдаемых по всем вариационным рядам концентраций, к их медианам, которая формирует предельный (самый крайний) диапазон шкалы, начинающийся от 20 (4 балла). Градация частных оценочных баллов ( $S_b$ ) по величине кратности превышения фактического содержания вещества (металла) в ДО над фоновым выглядит следующим образом: <1 (0 баллов), 1–3 (1 балл), 3–9 (2 балла), 9–20 (3 балла), >20 (4 балла).

Класс опасности корректирует шкалу в виде эмпирического коэффициента, найденного в результате сопоставления кривых, полученных для металлов разного класса опасности:

Кратность ранга шкалы = Кратность ранга  $\times$  (0,5  $\times$  Класс опасности).

Текущая (принятая по умолчанию) градация шкалы кратности превышения рассчитана для

веществ 2 класса опасности. Для 1 класса диапазоны ее градаций будут, соответственно, в 2 раза ( $\times 0,5$ ) ниже, а для 3 класса – в 1,5 раза выше. Например, 1 балл для 3 класса опасности будет соответствовать 1,5–4,5-кратному превышению, а не 1–3-кратному, как для 2 класса. Для 1 класса, соответственно, 1–1,5-кратному. Кратности, меньшие или равные 1, не пересчитываются.

Из исследуемых ТМ к 1 классу опасности (высокоопасные) относят Cd, Pb и Zn, к 2 классу (умеренно опасные) – Co, Ni, Cu, Cr, к 3 классу (малоопасные) – Mn. При расчете градаций шкалы кратности превышений Fe условно было отнесено нами к 3 классу.

Как известно, большая часть ТМ в поверхностных водах находится в связанном состоянии с органическими или неорганическими лигандами. ДО депонируют ионы металлов и их комплексные соединения из водной среды в растворенной форме и в составе взвешенного вещества. Особую роль в связывании металлов в хелатные комплексы играют гумусовые вещества различной природы, сорбирующиеся на частицах пелитовой размерности [Мур, Рамамурти, 1987; Моисеенко и др., 2006]. Таким образом, именно тонкодисперсные частицы формируют потенциальную сорбционную емкость ДО. Отложения, относящиеся к типу глинистых илов с содержанием частиц размером < 0,01 мм более 30 %, способны аккумулировать и удерживать металлы в количествах в 2–3 раза выше, чем у песчаных типов отложений с содержанием пелитовой фракции до 30 %.

Следует отметить, что при обобщающих оценках, когда необходимо сопоставить разные вариационные ряды наблюдений, важно

не абсолютное содержание пелитовых частиц в конкретном образце (элементе этого ряда), а доля образцов с высоким содержанием мелкодисперсных частиц в том или ином ряду наблюдений. С этой целью в алгоритм расчетов введен коэффициент, корректирующий фоновый показатель, относительно которого рассчитываются частоты и кратности. Коррекция осуществляется по регрессионной зависимости:

$$K_{\text{пелит}} = 0,48 \times D + 0,52,$$

где D – доля наблюдений (проб) с содержанием частиц < 0,01 мм более 30 %, выраженная в долях единицы.

Указанная зависимость была установлена эмпирически в результате анализа частотных характеристик рядов концентраций ТМ в ДО разного гранулометрического состава. Кроме того, используемые в расчетах фоновые концентрации ТМ также учитывают содержание пелитовой фракции, предлагая для таких ДО более высокие значения фона [Региональные..., 2019].

Учет критических показателей загрязненности (КПЗ) применительно к ДО также был несколько модифицирован: он исходит не от  $S_a \geq 9$ , т. е. 56,3 % максимально возможного значения (9 из 16), а от  $S_a \geq 12$  (75 %), что, с нашей точки зрения, оправданно, если учесть,

Таблица 1. Классификация качества ДО по значению удельного комбинаторного индекса загрязненности (УКИЗДО)

Table 1. Sediments quality classification by the value of the specific combinatorial pollution index (SCSPI)

УКИЗДО SSCPI	Класс и разряд Class and grade	Степень загрязненности ДО Degree of sediments pollution
< 1	1	Чистые Unpolluted
1–3	2	Слабо загрязненные Slightly polluted
3–5	3а	Умеренно загрязненные Moderately polluted
5–6	3б	Умеренно загрязненные Moderately polluted
6–8	4а	Сильно загрязненные Strongly polluted
8–9	4б	Сильно загрязненные Strongly polluted
9–10	4в	Очень сильно загрязненные Very strongly polluted
10–11	4г	Очень сильно загрязненные Very strongly polluted
> 11	5	Экстремально грязные Extremely polluted

что речь в данном случае идет о загрязнении такой достаточно инертной среды, как ДО.

В таблице 1 представлена градация значений УКИЗДО и соответствующие ей классы, разряды чистоты и характеристики загрязненности ДО. В данной градации между классами выдержано два балла, а между разрядами – по одному.

Система расчета УКИЗДО была протестирована на трех группах водоемов РТ, отличающихся показателями антропогенной нагрузки: I) лесные озера, в т. ч. озера Раифского участка Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника (n = 103); II) озера агроландшафтов (n = 122); III) водоемы, расположенные в черте г. Казани (n = 310).

В качестве пороговых значений использовали не медианы, а верхние пределы региональных фоновых концентраций ТМ в глинистых ДО озер РТ [Региональные..., 2019] (табл. 2), чтобы максимально приблизить расчеты УКИЗДО и УКИЗВ, так как метод расчета УКИЗВ оперирует не фоновыми значениями, а предельно-допу-

Таблица 2. Фоновые концентрации валовых и подвижных форм ТМ и Fe в ДО озер, использованные при расчете УКИЗДО, мг/кг [Региональные..., 2019]

Table 2. The background concentrations of total and available forms of heavy metals (HM) and Fe in lake sediments, used in the calculation of SCSPI, mg/kg [Regional ..., 2019]

ТМ HM	Фон Background	Верхний предел Background upper limit
Валовые формы Total forms		
Cd	0,34	0,62
Pb	18,0	25,2
Co	9,9	13,8
Cu	27,9	37,4
Ni	35,6	45,7
Zn	77,1	103,2
Cr	30,3	39,8
Mn	613,0	773,5
Fe	19108,3	26746,7
Подвижные формы Mobile forms		
Cd	0,23	0,38
Pb	5,15	7,34
Co	0,58	0,81
Cu	1,46	3,27
Ni	2,02	3,31
Zn	6,49	19,40
Cr	0,68	1,04
Mn	266,3	350,6
Fe	194,7	252,5

Таблица 3. УКИЗДО озер с различной антропогенной нагрузкой

Table 3. SCSPi for lakes with different anthropogenic load

Группы озер* Lakes groups	УКИЗДО SCSPi	К**	Степень и класс загрязненности Degree and class of pollution
Валовые формы Total forms			
I	1,82	12,3	Слабо загрязненные, 2 класс Slightly polluted, 2 class
II	3,37	17,2	Умеренно загрязненные, 3а класс Moderately polluted, 3a class
III	7,79	23,3	Сильно загрязненные, 4а класс Strongly polluted, 4a class
Подвижные формы Mobile forms			
I	0,96	2,5	Чистые, 1 класс Nonpolluted, 1 class
II	3,20	11,3	Умеренно загрязненные, 3а класс Moderately polluted, 3a class
III	7,36	21,0	Сильно загрязненные, 4а класс Strongly polluted, 4a class

Примечание. \* См. пояснения в тексте. \*\* Коэффициент комплексности загрязненности.

Note. \* See explanations in the text. \*\* Pollution factor.

стимыми концентрациями, превышение которых однозначно определяет токсический эффект.

В ранжированном по величине антропогенной нагрузки ряду водоемов комплексные показатели загрязнения ДО ТМ и железом закономерно возрастают: согласно расчетам, наиболее чистыми (1–2 класса) являются отложения фоновых озер (I группа), наиболее грязными (4 класса) – озера на территории г. Казани (III группа). Озера агроландшафтов, по генезису в основном относящиеся к группе карстовых озер, занимают промежуточное положение (табл. 3). По величине УКИЗДО, рассчитанной для валовых и подвижных форм металлов, отложения озер II и III групп оказались практически равными по качеству, а отложения озер I группы характеризовались разными классами чистоты. Анализ полученных данных показал, что большая «загрязненность» ДО фоновых озер, оцениваемая по валовому содержанию ТМ, связана с относительно повышенными концентрациями в них соединений железа и частично марганца. Накопление последних в составе ДО отражает природный геохимический фон, характерный для водосборных территорий лесных озер региона. В основном по этой же причине наблюдается и относительно более высокий коэффициент комплексности загрязненности  $K_{cp}$  для валовых форм ТМ по сравнению с подвижными формами.

Оценивая предлагаемый методический подход, следует отметить, что расчеты УКИЗДО по анализируемым группам водоемов показали хорошую сходимость полученных с его помощью результатов с другими разрабатываемы-

ми нами подходами к оценке качества ДО озер РТ, оперирующими методами вероятностной статистики [Валиев и др., 2016].

Для проверки возможности совместного использования показателей УКИЗВ и УКИЗДО с целью комплексной экологической оценки состояния водных объектов были выполнены расчеты обоих индексов для двух крупнейших озер РТ, входящих в региональную систему особо охраняемых природных территорий, – Архирейское и Ковалинское. Их можно отнести к типичным «фоновым» водоемам; по озерам накоплены многолетние ряды гидрохимических наблюдений, а также сведения о геохимическом составе и свойствах их поверхностных и стратифицированных ДО, требуемые для расчета комбинаторных индексов.

По валовым формам сходимость величин УКИЗДО и УКИЗВ не проявилась, в обоих озерах отложения характеризовались как «слабо загрязненные» (табл. 4). В величину класса чистоты здесь также вносят значительный вклад соединения Mn и Fe как типоморфные элементы вод исследуемых ландшафтов. Валовые формы ТМ, что совершенно очевидно, отражают общий и относительно стабильный во времени пул депонированных веществ, при определенных условиях способных перейти в категорию подвижных (растворимых), следовательно, определение УКИЗДО для этих форм позволяет выявлять долгосрочные тенденции и формулировать прогнозы изменения экологической ситуации в водоеме, дополняя количественные и качественные оценки, получаемые по растворенным в воде формам

Таблица 4. Сравнительная оценка удельных комбинаторных индексов качества воды (УКИЗВ) и ДО (УКИЗДО), рассчитанных по содержанию ТМ и железа

Table 4. Comparative assessment of specific combinatorial indices of water (SCWPI) and sediments (SSCPI) quality, calculated on the heavy metals (HM) and iron concentrations

	УКИЗВ, УКИЗДО, степень загрязненности, класс качества SCWPI, SSCPI, pollution degree, quality class	
	оз. Архиерейское Lake Archiereyskoye	оз. Ковалинское Lake Kovalinskoye
Растворенные формы ТМ в воде Dissolved forms of HM in water	0,63 Условно чистая, 1 класс Conditionally clean, 1 class	0,70 Условно чистая, 1 класс Conditionally clean, 1 class
Подвижные формы ТМ в ДО Mobile forms of HM in sediments	0,64 Чистые, 1 класс Unpolluted, 1 class	0,80 Чистые, 1 класс Unpolluted, 1 class
Валовые формы ТМ в ДО Total forms of HM in sediments	2,08 Слабо загрязненные, 2 класс Slightly polluted, 2 class	2,56 Слабо загрязненные, 2 класс Slightly polluted, 2 class

ТМ или по их подвижным формам в ДО, которые более динамичны как во времени, так и в пространстве.

Как УКИЗВ, так и УКИЗДО, рассчитанный по содержанию подвижных форм ТМ, показали одинаковые характеристики чистоты (табл. 4), что отражает парадигму функционирования системы «вода – донные отложения», когда изменение показателей растворимости (подвижности) соединений металлов под влиянием физико-химических факторов среды меняет их миграционное поведение и ведет либо к аккумуляции и иммобилизации в составе ДО, либо к переходу в растворенное состояние и последующему росту концентраций в придонном слое и во всей толще воды, т. е. к вторичному загрязнению.

## Заключение

Проведенные исследования показали, что методика комплексной оценки качества поверхностных вод путем расчета величины удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ) может быть адаптирована и для оценки качества ДО по приоритетным загрязняющим веществам – ТМ, нефтепродуктам и т. д. Система формализованных показателей расчета удельного комбинаторного индекса загрязненности ДО (УКИЗДО) предполагает использование частотных характеристик рядов данных, балльную оценку этих характеристик, обобщение балльных оценок с приведением их к соответствующим классам чистоты по аналогии с РД 52.24.643–2002. В алгоритме расчета УКИЗДО заложены корректирующие коэффициенты, учитывающие класс опасности загрязняющих веществ, а также особенности накопления поллютантов в зависимости от грануло-

метрического состава отложений. В качестве нормативов, относительно которых проводятся расчеты степени загрязненности ДО, применяются верхние пределы региональных фоновых концентраций ТМ в ДО озер РТ, утвержденные в установленном законом порядке.

Градация показателя УКИЗДО представлена 5 классами качества, разделенными на 9 рядов и соответствующих им степеней загрязненности: от чистых 1 класса (УКИЗДО < 1) до экстремально грязных 5 класса (УКИЗДО > 11).

По результатам апробации методики расчета удельного комбинаторного индекса загрязненности ДО на примере озер РТ установлена высокая сходимость комплексных оценочных показателей загрязненности воды (УКИЗВ) и УКИЗДО, определенных для растворенных в воде форм ТМ и их подвижных форм в составе ДО. Комплексный критерий загрязненности ДО валовыми формами ТМ при этом также содержит важную интегральную информацию, позволяющую прогнозировать и оценивать тенденцию состояния водоема в перспективе, с учетом изменения внешней и внутренней нагрузки на его экосистему.

## Литература

- Валиев В. С., Иванов Д. В., Зиганшин И. И., Шамаев Д. Е., Маланин В. В., Марасов А. А. Анализ распределения форм металлов в донных отложениях озер природных и урбанизированных территорий Республики Татарстан // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 9. С. 57–67. doi: 10.17076/lim413
- Моисеев Т. И., Кудрявцева Л. П., Гашкина Н. А. Рассеянные элементы в поверхностных водах суши: технофильность, биоаккумуляция и экотоксикология. М.: Наука, 2006. 261 с.
- Мур Д., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах. М.: Мир, 1987. 288 с.

РД 52.24.609–2013. Организация и проведение наблюдений за содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях водных объектов / Минво природных ресурсов и экологии РФ, Росгидромет. Ростов-на-Дону, 2013. 39 с.

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

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.) // Гарант.ру. Инф.-прав. портал [Электронный ресурс]. URL:

## References

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

Mur D., Ramamurti S. Tyazhelye metally v prirodnykh vodakh [Heavy metals in natural waters]. Moscow: Mir, 1987. 288 p.

RD 52.24.609–2013. Organizatsiya i provedenie nablyudeniya za sodержaniem zagryaznyayushchikh veshchestv v donnykh otlozheniyakh vodnykh ob'ektov [Organization and carrying out observation of the content of pollutants in sediments of water objects]. Ministry of Nat. Res. Ecology Russ. Federation, Russ. Federal Service for Hydrometeorology and Environment Monitoring. Rostov-on-Don, 2013. 39 p.

RD 52.24.643–2002. Metod kompleksnoi otsenki stepeni zagryaznennosti poverkhnostnykh vod po gidrokhimicheskim pokazatelyam [The method of complex assessment of surface water contamination by hydrochemical indicators]. Russ. Federal Service for Hydrometeorology and Environment Monitoring. Rostov-on-Don, 2002. 50 p.

Regional'nye normativy "Fonovoe sodержanie tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyakh poverkhnostnykh vodnykh ob'ektov Respubliki Tatarstan" (utv. Prikazom Min-va ekologii i prirodnykh resursov RT ot 27.03.2019 g.) [Regional guidelines Background heavy

<http://www.garant.ru/hotlaw/tatarstan/1270863/> (дата обращения: 10.08.2019).

Томилина И. И., Комов В. Т. Донные отложения как объект токсикологических исследований (обзор) // Биология внутренних вод. 2002. № 2. С. 20–26.

Forstner U., Wittmann G. T. W. Metal pollution in aquatic environment. Berlin-Heidelberg-NY: Springer, 1983. 481 p.

Muller G., Ottenstein R., Yahya A. Standardized particle size for monitoring, inventory, and assessment of metals and other trace elements: <20 µm or <2 µm? // Fresenius J. Anal. Chem. 2001. Vol. 371. P. 637–642.

Поступила в редакцию 19.08.2019

metals content in bottom sediments of surface water bodies in the Republic of Tatarstan (approved by the Order dated 27.03.2019 of the Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Tatarstan). URL: <http://www.garant.ru/hotlaw/tatarstan/1270863/> (accessed: 10.08.2019).

Tomilina I. I., Komov V. T. Donnye otlozheniya kak ob'ekt toksikologicheskikh issledovaniy (obzor) [Bottom sediments as an object of toxicological study (an overview)]. Biol. vnutr. vod [Inland Water Biol.]. 2002. No. 2. P. 20–26.

Valiev V. S., Ivanov D. V., Ziganshin I. I., Shamaev D. E., Malanin V. V., Marasov A. A. Analiz raspredeleniya form metallov v donnykh otlozheniyakh ozer prirodnykh i urbanizirovannykh territorii Respubliki Tatarstan [Metals forms distribution in lakes sediments of natural and urban areas of the Republic of Tatarstan]. Trudy KarNTs RAN [Trans. KarRC RAS]. 2016. No. 9. P. 57–67. doi: 10.17076/lim413

Forstner U., Wittmann G. T. W. Metal pollution in aquatic environment. Berlin-Heidelberg-NY: Springer, 1983. 481 p.

Muller G., Ottenstein R., Yahya A. Standardized particle size for monitoring, inventory, and assessment of metals and other trace elements: <20 µm or <2 µm? Fresenius J. Anal. Chem. 2001. Vol. 371. P. 637–642.

Received August 19, 2019

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### 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

## CONTRIBUTORS:

### Valiev, Vsevolod

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

**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

**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

**Ivanov, Dmitry**

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

**Shagidullin, Rifgat**

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

УДК 556.114.7 (282.247.211)

## СОДЕРЖАНИЕ, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И СООТНОШЕНИЕ ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ВОДЕ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

**Т. А. Ефремова, М. В. Зобкова**

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

Представлены результаты сезонных исследований основных компонентов органического вещества (фульвовых и гуминовых кислот, углеводов, липидов, белков, мочевины), выполненных в 2016–2017 гг. Исследование проводилось в олиготрофной олигогумусной центральной части Онежского озера, в мезотрофной мезогумусной Петрозаводской губе, а также в устье эвтрофной мезополигумусной реки Шуи. Рассмотрено содержание, сезонное распределение и соотношение основных компонентов органического вещества в зависимости от разного уровня трофии и гумусности. Установлено, что органическое вещество в Онежском озере в основном представлено гумусовыми веществами, содержание которых составляло 7,2–33,4 мг/л и увеличивалось с ростом гумусности. Наименьшее их количество отмечено в Центральном плесе Онежского озера (в среднем 68 %), а наибольшее – в устье р. Шуи (в среднем 81 %). Вторым по количеству компонентом органического вещества являлись углеводы, на них приходилось в среднем 10 %, а концентрация составляла 0,8–3,0 мг/л. Значительно меньше содержалось липидов (0,04–0,28 мг/л), белков (0,02–0,13 мг/л) и мочевины (0,02–0,09 мг/л), а их количество от общего содержания органического вещества составляло ~ 1; 0,4 и 0,3 % соответственно. В составе автохтонного органического вещества основным идентифицированным компонентом являлись свободные углеводы (30 %), значительно меньше выявлено белков (11 %), липидов (3 %) и мочевины (2 %). Гумусовые вещества – основной компонент аллохтонного органического вещества, а в их составе преобладают фульвовые кислоты. Соотношение фульвовых и гуминовых кислот в среднем составляло 6:1, что соответствовало данным из других водных объектов.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** органическое вещество природных вод; фульвовые и гуминовые кислоты; углеводы; липиды; белки; мочевина; Онежское озеро.

### **T. A. Efremova, M. V. Zobkova. CONCENTRATION, DISTRIBUTION AND RATIO OF THE MAIN ORGANIC MATTER COMPONENTS IN LAKE ONEGO WATER**

Seasonal studies of the main organic matter components (fulvic and humic acids, carbohydrates, lipids, proteins, urea) were carried out in 2016–2017. The research was conducted in the oligotrophic and oligohumic central part of Lake Onego, mesotrophic and mesohumic Petrozavodsk Bay, and mouth of the eutrophic and mesopolyhumic River Shuya. The concentration, seasonal distribution and ratio of the main organic matter components were considered depending on the different trophic and humus levels. It was found that the main component of organic matter in Lake Onego was humic substances,

whose concentrations ranged from 7.2 to 33.4 mg/l and increased with a rise in the humus status. Their content was minimal in the central part of Lake Onego (68 % on average), and maximal in the Shuya River mouth (81 % on average). The second largest component of organic matter was carbohydrates, which contributed on average 10 %, and their concentration was 0.8–3.0 mg/l. The concentrations of lipids (0.04–0.28 mg/l), proteins (0.02–0.13 mg/l) and urea (0.02–0.09 mg/l) were significantly lower, and their contributions to total organic matter were ~1 %, ~0.4 % and ~0.3 %, respectively. It was found that the major constituent of autochthonous organic matter was free carbohydrates (30 %); the proportion of lipids was much lower (11 %), as well as those of proteins (3 %) and urea (2 %). Humic substances were the main component of allochthonous organic matter and fulvic acids prevailed in their composition. The fulvic/humic acids ratio averaged 6:1, and was in congruence with data from other water bodies.

**Key words:** organic matter in natural waters; fulvic and humic acids; carbohydrates; lipids; proteins; urea; Lake Onego.

## Введение

Органическое вещество (ОВ) природных вод является сложной многокомпонентной системой, состоящей из огромного числа индивидуальных соединений (гумусовые вещества, углеводы, липиды, белки, аминокислоты, нуклеиновые кислоты и продукты их распада, мочевины, летучие органические соединения, фенолы и др. компоненты). Эти соединения отличаются друг от друга строением, свойствами, происхождением, размером молекул и количественным содержанием в природных водах. ОВ в поверхностных водах – это интегральный показатель, величина которого в основном зависит от трофности и гумусности вод, от соотношения скоростей продукционно-деструкционных процессов и от величины стока. Количественное содержание основных компонентов ОВ (гумусовых веществ, белков, углеводов и липидов) и их соотношение позволяют судить о происхождении, путях трансформации и пищевой ценности ОВ для высших трофических уровней данной экосистемы.

В зависимости от источника происхождения ОВ природных вод делят на автохтонное и аллохтонное. В естественных незагрязненных водоемах автохтонное ОВ представлено биохимически легкоокисляемыми соединениями, такими как свободные углеводы, липиды, белки, мочевины и другие вещества, а аллохтонное – гумусовыми веществами. Последние вносят существенный вклад в общее содержание ОВ поверхностных вод, в некоторых водных объектах их количество может достигать 90 % [McKnight, Aiken, 1998], в то же время в мировом океане их содержание варьирует только от 0,7 до 2,4 % [Rocker et al., 2012].

К настоящему времени накоплены обширные сведения о содержании, распределении и трансформации отдельных составляющих ОВ

в природных водах. И если гумусовые вещества, как компонент аллохтонного ОВ, изучаются в поверхностных водах суши регулярно [Левшина, 2006; Cory et al., 2007; Linnik et al., 2013], то изучение компонентов автохтонного ОВ выполнено по большей части только на примере морских вод [Агатова и др., 2011; Немировская, Артемьев, 2013; Kim et al., 2018].

Исследование основных компонентов ОВ в водных экосистемах представляет интерес во многих отношениях. Их распределение отражает в целом функционирование водных экосистем, так как образование этих компонентов в водоемах связано с жизнедеятельностью живых организмов и со средой обитания [Bade et al., 2007]. Состав ОВ лабилен и может изменяться в зависимости от интенсивности первичного продуцирования, преобразования ОВ вторичными продуцентами, поступления с водосборной территории и антропогенного влияния. Влияние физических и биологических процессов на экосистему легче проследить и оценить по индивидуальным химическим компонентам. Например, основным продуктом первичного продуцирования являются углеводы, которые далее преобразуются в другие соединения в результате клеточного метаболизма. В морях отмечена высокая корреляция между количеством взвешенных углеводов и биомассой фитопланктона [Liebezeit, 1987; Агатова и др., 2001], а также между интенсивностью первичного продуцирования и количеством растворенных углеводов [Sellner, 1981; Агатова и др., 2001]. Концентрация взвешенного белка дает представление о количестве гетеротрофных микроорганизмов, которые являются основными трансформаторами как автохтонного, так и аллохтонного ОВ [Cho, Azam, 1990]. Такие соединения, как гумусовые вещества, углеводы, белки, липиды, мочевины, являются основными классами естественного ОВ в незагрязненных

водоемах, и изменение их содержания отражает экологическую обстановку в водном объекте. Так, повышенные концентрации липидов и мочевины в поверхностных водах указывают на загрязнение водного объекта сельскохозяйственными, хозяйственно-бытовыми сточными водами, а также стоками предприятий пищевой и кожевенной промышленности. Кроме того, высокие концентрации растворенных и взвешенных липидов находятся в тесной связи с наличием скоплений рыбы и зоопланктона [Агатов, 2017]. Высокое содержание углеводов обусловлено загрязнением водоема сточными водами пищевой и целлюлозно-бумажной промышленности, а также «цветением» воды [Шаова, 1971; Ефремова и др., 2013].

Поскольку ОВ вносит неотъемлемый вклад в функционирование водных экосистем и может отражать экологическую обстановку в водоеме, то для четкого понимания источников поступления и протекания внутриводоемных процессов необходимо знать не только общее содержание ОВ и концентрацию отдельных соединений, но и состав, а также соотношение всех его основных компонентов. Поэтому целью данного исследования является определение содержания и распределения основных компонентов ОВ, установление их соотношения в зависимости от уровня трофии и гумусности, а также выявление их сезонной изменчивости в центральной части Онежского озера, в Петрозаводской губе и р. Шуе.

## Материалы и методы

Онежское озеро расположено на северо-западе Российской Федерации и является вторым по величине пресноводным озером в Европе. Оно расположено между 59°54' и 61°47' с. ш., площадь зеркала составляет 9720 км<sup>2</sup>, водосбора – 53 100 км<sup>2</sup>, средняя глубина озера – 30 м, объем воды – 291 км<sup>3</sup>. Озеро относится к большим стратифицированным водоемам, его удельный водосбор составляет 5,5, а условный водообмен – 16 год<sup>-1</sup>. Онежское озеро имеет ледниково-тектоническое происхождение и находится в зоне сопряжения кристаллического Балтийского щита и Русской платформы, что определяет изрезанную береговую линию с множеством заливов и скалистых берегов в северной части озера и относительно равнинное побережье на юге.

Петрозаводская губа составляет 0,8 % площади Онежского озера, ее котловина широко открыта и имеет постепенный уклон в сторону глубоководной части озера, что обуславливает ее высокую проточность [Онежское...,

1999]. Общий объем притока в залив составляет 3,35 км<sup>3</sup> в год, 93 % его приходится на реку Шуя, впадающую в вершинную часть губы. С ее водами происходит поступление в озеро большого количества ОВ гумусового происхождения, так как водосбор реки характеризуется высокой залесенностью, заболоченностью и озерностью.

Кроме того, на территории губы расположен крупный промышленный центр – г. Петрозаводск, источник поступления антропогенного ОВ. Поэтому вода в губе имеет мезотрофный мезогумусный статус, а ее качество формируется за счет смешения озерных, речных и сточных вод [Сабылина и др., 2010].

На Онежском озере исследование ОВ и его компонентов осуществлялось осенью (сентябрь) 2016 г., а также в зимний (март), весенний (июнь) и летний (август) периоды 2017 г. Пробы воды отбирали в центральной части озера (С3) и в центре Петрозаводской губы (Р2) в поверхностном и придонном горизонтах (0,5; 27,5 м для станции Р-2 и 0,5; 46,0 м для станции С-3), а также в устье главного притока губы – р. Шуи (рис. 1).

Природную воду для изучения ОВ отбирали батометром Рутнера, который предварительно несколько раз ополаскивали исследуемой водой. Для определения липидов использовали стеклянную посуду, а для других химических показателей – полиэтиленовую. Так как в воде постоянно протекают биохимические процессы, ведущие к окислению компонентов ОВ, липиды фиксировали на месте отбора проб 20 мл смеси Фолча (хлороформ : этанол : метанол в соотношении 2:1:1), которые являются первой порцией из трех, при экстракции липидов из воды. Полученные экстракты анализировали или хранили в холодильнике при  $t = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до 1 месяца. Остальные компоненты определяли непосредственно после отбора проб в исходной воде.

Для количественной оценки лабильных (свободных углеводов, липидов, белков и мочевины) и устойчивых (гумусовых веществ: фульвовых и гуминовых кислот и в их составе связанных углеводов) компонентов ОВ разделяли на автохтонную и аллохтонную составляющие адсорбцией на диэтиламиноэтилцеллюлозе (ДЭАЭ-целлюлоза) согласно методике [Лозовик, Мусатова, 2013]. После проведения адсорбции на ДЭАЭ-целлюлозе выделение связанных с адсорбентом гумусовых веществ и их последующее разделение на фульвовые и гуминовые кислоты осуществляли по стандартной методике [АРНА..., 1999]. Расчет концентрации гумусовых веществ в воде осуществлял



Рис. 1. Карта-схема отбора проб воды в Онежском озере  
 Fig. 1. Water sample locations in Petrozavodsk Bay and Lake Onego

ся по содержанию  $C_{орг}$ , который определяли по методике [Зобков, Зобкова, 2015]. Содержание общего ОВ принималось равным  $2C_{орг}$ .

Определение концентрации липидов и углеводов проводилось по усовершенствованным методикам применительно к поверхностным водам гумидной зоны с L-триптофановым и фосфованилиновым реактивом соответственно [Лозовик, Ефременко, 2017], белков – с красителем Кумасси R-250 [Руководство..., 2004].

Углеводы в природных водах находятся в двух формах: растворенные и взвешенные. С помощью методики разделения ОВ на аллохтонную и автохтонную составляющие с использованием ДЭАЭ-целлюлозы из растворенных углеводов нами были выделены еще две фракции: свободные и связанные с гумусовыми веществами углеводы.

Количественное определение форм углеводов в поверхностных водах осуществляли по следующей схеме:

1) общее содержание углеводов ( $Y_{общ}$ ) в исходной воде (растворенные, связанные с гумусовыми веществами и во взвеси);

2) растворенные углеводы ( $Y_{раств}$ ) в воде после удаления взвешенных веществ центрифугированием;

3) содержание взвешенных углеводов ( $Y_{взв}$ ) определяли по разности  $Y_{общ}$  и  $Y_{раств}$ , а также путем анализа взвеси, выделенной на стекловолокнистых фильтрах (фильтрование проб воды через стекловолокнистые фильтры «Ватман» GF/F, 0,7 мкм);

4) свободные углеводы ( $Y_{своб}$ ) в воде после удаления гумусовых веществ адсорбцией на ДЭАЭ-целлюлозе;

5) содержание связанных углеводов ( $Y_{связ}$ ) рассчитывали по разности концентрации растворенных и свободных углеводов:

$$Y_{связ} = Y_{раств} - Y_{своб}$$

Для количественного определения мочевины использовалась ее способность гидролизаться в кислой среде до  $NH_3$  и  $CO_2$ , что положено в основу методики [Рыжаков, Кукконен, 2014].

## Результаты и обсуждение

ОВ в Онежском озере распределено неравномерно, его содержание в прибрежной зоне и губах выше, чем в центре, что вызвано рядом различных факторов. Так, вода центральной части озера характеризуется высоким качеством (ЦВ < 40 град.,  $P_{общ}$  < 12 мкг/л, pH 6,5–8,0,  $O_2$  – 80–105 %, Fe – до 0,2 мг/л)

[Озера..., 2013] и имеет олиготрофный олигогумусный характер, поэтому концентрация ОВ изменялась слабо в течение всего периода наблюдений – 6,2–7,2 (в среднем 6,7) мгС/л. Это связано с тем, что Центральный плес, обладая значительным объемом водных масс, достаточно удален от губ и прибрежных территорий, испытывающих влияние природного и антропогенного ОВ, поступающего с водосборной территории.

В Петрозаводской губе в зависимости от различных условий ОВ может быть представлено как озерными водами, так и речными, поэтому его концентрация изменялась от 7,1 до 15,2 (в среднем 10,9) мгС/л. Воды р. Шуи содержат значительное количество аллохтонного ОВ гумусовой природы и классифицируются как эвтрофные мезополигумусные. Концентрация ОВ в реке оставалась на высоком уровне и незначительно изменялась в течение всего периода наблюдений, составляя 16,2–18,6 (в среднем 17,4) мгС/л. Эти данные хорошо согласуются с многолетними наблюдениями [Крупнейшие..., 2015], что указывает на стабильность экосистемы озера.

Анализ данных показал, что содержание растворенного автохтонного ОВ в Онежском озере в течение всего периода наблюдений изменялось слабо и варьировало в пределах 3,8–5,5 (в среднем  $4,3 \pm 0,5$  мг/л), что согласуется с данными, ранее полученными для этого озера [Зобкова и др., 2017]. Концентрация аллохтонного ОВ, напротив, была неоднородной, в Онежском озере наблюдалось ярко выраженное уменьшение содержания аллохтонного ОВ от Петрозаводской губы (в среднем  $15,2 \pm 3,6$  мг/л), подверженной влиянию высокогумусных вод р. Шуи (30,5 мг/л), к центральной части озера (в среднем  $9,1 \pm 0,9$  мг/л). Это подтверждает тот факт, что основное отличие водоемов связано с различным содержанием в них аллохтонного ОВ, в то время как содержание автохтонного сравнительно низко и изменяется в узких пределах [Зобкова и др., 2015; Лозовик и др., 2017].

#### *Гумусовые вещества*

Основным компонентом аллохтонного ОВ в исследованных водных объектах являются гумусовые вещества, на долю которых обычно приходится 91–100 % (в среднем 94 %) ОВ [Зобкова и др., 2017]. Гумусовые вещества представляют собой темноокрашенные высокомолекулярные соединения и имеют сложное нерегулярное строение. Они образуются под воздействием многостадийных биологических

и химических процессов при трансформации органических остатков растений и животных. Гумусовые вещества вносят существенный вклад в общее содержание ОВ поверхностных вод суши, а их концентрация может изменяться в широких пределах. Исследования показали, что это связано с влиянием различных факторов, таких как площадь и уклон водосборной территории [Aitkenhead-Peterson et al., 2003], наличие болот и торфяников [Xenopoulos et al., 2003], климатические факторы [Curtis, 1998], а также период водообмена водоема и его удельный водосбор [Лозовик и др., 2007].

Исследование ОВ в 2016–2017 гг. позволило установить, что содержание гумусовых веществ в Онежском озере составляло 8,0–23,0 мг/л (табл. 1). При этом значения, полученные для Центрального плеса озера, являлись минимальными и хорошо согласовались с ранее установленными [Лапин, Красюков, 1991], что свидетельствует о стабильности экосистемы озера. В то же время содержание гумусовых веществ, поступающих с р. Шуей, было максимальным (табл. 1) и несколько превышало значения, установленные в середине восьмидесятых годов (19,8–22,8 мг/л) [Лапин, Красюков, 1991]. Это можно объяснить тем, что в указанный период поступление ОВ с водосборной территории было в целом ниже, чем в настоящее время. Об этом свидетельствуют полученные значения таких косвенных показателей ОВ, как цветность, перманганатная окисляемость (ПО) и химическое потребление кислорода (ХПК), которые в среднем составляли 150 град., 16,9 и 30,4 мгО/л соответственно [Лозовик, Фрейндлинг, 1991], в то время как 2016–2017 гг. цветность достигала 150–163 град., ПО – 21,6–22,6 мгО/л и ХПК – 44,9–49,0 мгО/л.

Как было отмечено ранее, концентрация гумусовых веществ в р. Шуде существенно выше, чем в центральной части озера. Иная ситуация наблюдалась в Петрозаводской губе, которая испытывает влияние и озерных, и речных вод, что сказывается на концентрациях гумусовых веществ в ней. С одной стороны, губа имеет хороший обмен водных масс с открытой частью озера (период водообмена – 0,35), а с другой, р. Шуя вносит существенный вклад в поступление в Петрозаводскую губу ОВ гумусовой природы. В зависимости от влияния вышеперечисленных факторов, а также водности года, гидрологических и климатических особенностей по содержанию гумусовых веществ вода в Петрозаводской губе в различные сезоны может быть близка или к озерным, или к речным водам (рис. 2).

Распределение гумусовых веществ в толще воды на различных станциях Онежского озера

Таблица 1. Сезонное содержание ОВ и его компонентов (гуминовые и фульвовые кислоты, углеводы, липиды и белки) в поверхностном (числитель) и придонном (знаменатель) горизонтах Онежского озера и р. Шуя  
 Table 1. Seasonal concentration of organic matter and its components (humic and fulvic acids, carbohydrates, lipids, and proteins) in the surface (numerator) and bottom (denominator) horizons of Lake Onego and the Shuya River

Объект исследования (станция) Object (Station)	Сезон Season	С <sub>орг</sub> Organic carbon	ОВ Organic matter	Гумусовые вещества Humic substances	Фульвовые кислоты Fulvic acids	Гуминовые кислоты Humic acids	Углеводы Carbo-hydrates	Липиды Lipids	Белки Proteins
		мг/л mg/l							
Центральный плес Онежского озера (С3) Central part of Lake Onego (С3)	Осень 2016 Autumn 2016	$\frac{6,2}{6,2}$	$\frac{12,4}{12,4}$	$\frac{7,2}{8,4}$	–	–	$\frac{2,5}{-}$	$\frac{0,10}{-}$	$\frac{0,13}{-}$
	Зима 2017 Winter 2017	$\frac{7,2}{6,8}$	$\frac{14,4}{13,7}$	$\frac{12,0}{11,4}$	$\frac{10,4}{10,0}$	$\frac{1,6}{1,4}$	$\frac{1,6}{0,8}$	$\frac{0,04}{0,13}$	$\frac{0,04}{0,06}$
	Весна 2017 Spring 2017	$\frac{6,9}{6,9}$	$\frac{13,7}{13,7}$	$\frac{8,0}{8,0}$	$\frac{6,6}{6,6}$	$\frac{1,4}{1,4}$	$\frac{1,2}{0,9}$	$\frac{0,10}{0,28}$	$\frac{0,02}{0,03}$
	Лето 2017 Summer 2017	$\frac{7,0}{6,3}$	$\frac{14,0}{12,6}$	$\frac{9,3}{8,9}$	–	–	–	–	–
Петрозаводская губа (P2) Petrozavodsk Bay (P2)	Осень 2016 Autumn 2016	$\frac{10,9}{15,2}$	$\frac{21,8}{30,4}$	$\frac{16,8}{23,0}$	$\frac{14,8}{-}$	$\frac{2,0}{-}$	$\frac{2,6}{-}$	$\frac{0,10}{-}$	$\frac{0,13}{-}$
	Зима 2017 Winter 2017	$\frac{11,4}{9,7}$	$\frac{22,7}{19,3}$	$\frac{18,3}{15,2}$	$\frac{16,0}{13,4}$	$\frac{2,3}{1,8}$	$\frac{2,8}{2,7}$	$\frac{0,08}{0,09}$	$\frac{0,06}{0,04}$
	Весна 2017 Spring 2017	$\frac{12,7}{12,3}$	$\frac{25,5}{24,5}$	$\frac{17,2}{16,8}$	$\frac{13,4}{14,4}$	$\frac{3,6}{2,4}$	$\frac{2,8}{1,4}$	$\frac{0,22}{0,13}$	$\frac{0,05}{0,03}$
	Лето 2017 Summer 2017	$\frac{8,2}{7,1}$	$\frac{16,4}{14,2}$	$\frac{11,6}{10,0}$	–	–	–	–	–
Р. Шуя R. Shuya	Зима 2017 Winter 2017	18,6	37,3	33,4	30,6	2,8	3,0	0,25	0,21
	Весна 2017 Spring 2017	16,8	32,4	24,4	20,6	3,8	2,0	0,22	0,06

Примечание. Прочерк – определение не проводилось.

Note. Dash – not defined.

было неоднородно. В центральной части водоема концентрация гумусовых веществ практически не изменялась по глубине во все сезоны года. В то же время в Петрозаводской губе наблюдалось сезонное изменение содержания гумусовых веществ на различных горизонтах (см. рис. 2). Осенью и зимой их концентрация в поверхностном и придонном слоях воды значительно отличалась, что связано с интенсивным поступлением в губу более темных шуйских вод (осенью – в поверхностный слой, а зимой – в придонный). Весенний период характеризовался однородным распределением гумусовых веществ за счет активного переме-

шивания водных масс. Летом их концентрации в поверхностном и придонном слоях, а также в водах центральной части озера были близки, что вызвано сокращением стока реки и активным поступлением озерных вод в губу.

В составе гумусовых веществ изучены фульвовые и гуминовые кислоты (см. табл. 1). Содержание фульвовых кислот изменялось от 6,6 до 16,0 мг/л, было значительно выше, чем гуминовых (1,4–3,6 мг/л), и соответствовало значениям, установленным в ранее проводимых исследованиях [Лапин, Красюков, 1991]. Превалирование фульвовых кислот отражалось и на их соотношении с гуминовыми кислотами,

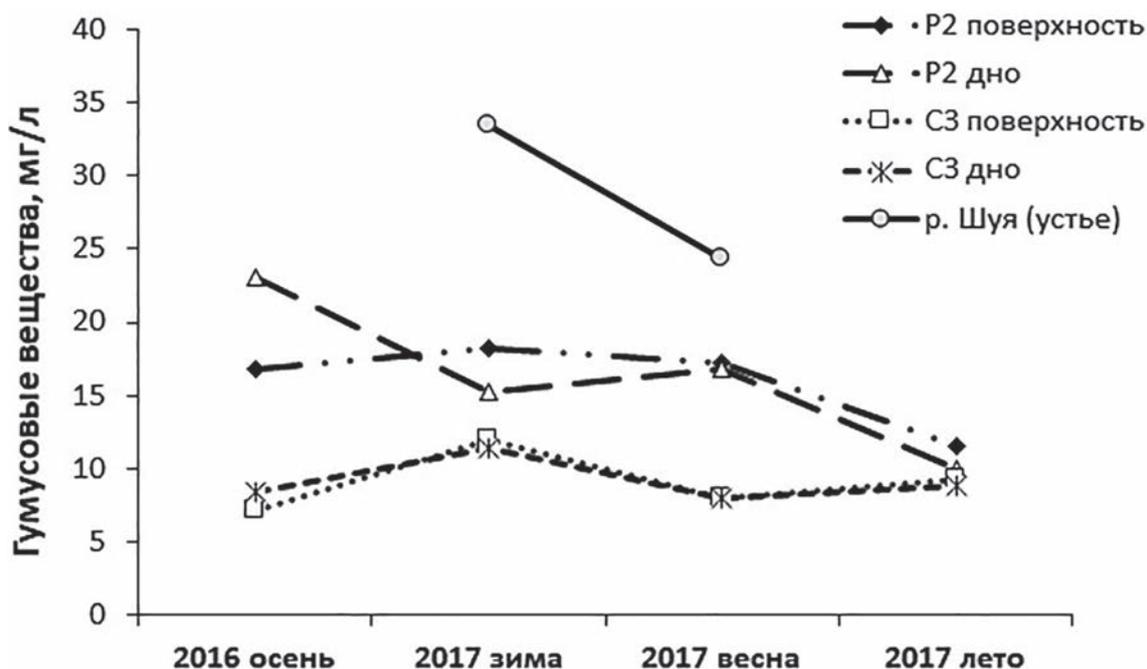


Рис. 2. Сезонное распределение гумусовых веществ в Онежском озере и р. Шуе  
 Fig. 2. Seasonal distribution of humic substances in Lake Onego and the Shuya River

которое составляло в среднем 6:1 в исследованных районах Онежского озера. Связано это с тем, что гуминовые кислоты интенсивно закрепляются в почвах в виде комплексов с ионами металлов и для них характерна меньшая растворимость в воде, а значит, поступление с водосборной территории ограничено.

#### Углеводы

Углеводы являются важным компонентом химического состава природных вод и играют существенную роль в формировании и поддержании жизни биоты в водных экосистемах. Это основной компонент растворенного ОВ, и их концентрации подвержены довольно значительным сезонным колебаниям, составляя от 10 до 70 % растворенного ОВ в морских водах [Benner, 2002; Агатова и др., 2012].

В результате исследований установлено, что среднее содержание углеводов в центральной части озера за весь период наблюдений составило 1,4 мг/л, а в Петрозаводской губе и в р. Шуе было почти в 2 раза выше – 2,5 мг/л (см. табл. 1). Центральный плес Онежского озера имеет олиготрофный статус, а Петрозаводская губа и р. Шуя – мезо- и эвтрофный соответственно, что говорит о разном содержании в них ОВ.

Полученные данные по сезонному распределению углеводов в центральной части Онежского озера показали, что их концентрация

уменьшается от осеннего периода к весеннему (табл. 1). В Петрозаводской губе и в р. Шуе содержание углеводов мало изменялось по сезонам года. По-видимому, это вызвано тем, что часть углеводов находится в связанном состоянии с гумусовыми веществами, которые преобладают в водах этих станций по сравнению с Центральным плесом.

Распределение углеводов по горизонтам характеризуется уменьшением их концентраций от поверхности ко дну (см. табл. 1). Как известно, основным источником ОВ в водной экосистеме в период открытой воды является первичное продуцирование, при котором благодаря фотосинтетическим процессам в фотическом слое из  $\text{CO}_2$  синтезируются углеводы, что и объясняет более высокие их концентрации в поверхностном горизонте.

В составе растворенных углеводов определялись их фракции: свободная и связанная с гумусовыми веществами. Наличие связанных углеводов объясняется тем, что гумусовые вещества – это продукты конденсации лигнина, углеводов, белков и других веществ [Орлов, 1990]. Следовательно,  $Y_{\text{раст}}$  являются компонентами как аллохтонного ОВ (к ним относятся  $Y_{\text{связ}}$ ), так и автохтонного –  $Y_{\text{своб}}$  в поверхностных водах.

В Онежском озере преобладают  $Y_{\text{раст}}$ , в среднем за год на их долю приходится около 90 %, а на долю  $Y_{\text{взв}}$  – 10 % от общего количества углеводов (табл. 2; рис. 3, а). Максимальное значение  $Y_{\text{взв}}$  (33 %) и минимальное  $Y_{\text{раст}}$  (67 %) было отме-

Таблица 2. Содержание различных форм углеводов по сезонам года в поверхностном (числитель) и придонном (знаменатель) горизонтах в Онежском озере и р. Шуе

Table 2. The content of various forms of carbohydrates in the surface (numerator) and bottom (denominator) horizons in Lake Onego and r. Shuya by the seasons of the year

Объект Object	Сезон Season	Углеводы, мг/л Carbohydrates, mg/l			
		Растворенные Dissolved	Взвешенные Suspended	Свободные Free	Связанные Related
Центральный плес Central part of Lake Onego	Осень 2016 Autumn 2016	2,5	<0,1	1,9	0,6
	Зима 2017 Winter 2017	$\frac{1,5}{0,6}$	$\frac{0,1}{0,2}$	$\frac{0,2}{0,5}$	$\frac{1,3}{0,1}$
	Весна 2017 Spring 2017	$\frac{0,8}{0,9}$	$\frac{0,4}{< 0,1}$	$\frac{0,4}{0,6}$	$\frac{0,4}{0,3}$
Петрозаводская губа Petrozavodsk Bay	Осень 2016 Autumn 2016	2,5	0,1	2,1	0,4
	Зима 2017 Winter 2017	$\frac{2,8}{2,5}$	$\frac{< 0,1}{0,2}$	$\frac{1,9}{0,6}$	$\frac{0,9}{1,9}$
	Весна 2017 Spring 2017	$\frac{2,6}{1,2}$	$\frac{0,2}{0,2}$	$\frac{1,2}{1,1}$	$\frac{1,4}{0,1}$
Р. Шуя R. Shuya	Зима 2017 Winter 2017	2,8	0,2	1,1	1,7
	Весна 2017 Spring 2017	1,8	0,2	0,5	1,3

Примечание. Осенью 2016 г. содержание углеводов было определено только в поверхностном горизонте.

Note. Content of carbohydrates was determined only in surface horizon in autumn 2016.

чено в центральной части озера весной в период активной вегетации диатомового планктона.

Как видно из рис. 3, б,  $Y_{\text{своб}}$  являются преобладающей формой в составе  $Y_{\text{раст}}$  в воде Центрального плеса и Петрозаводской губы. В воде высокогумусной р. Шуи, напротив, преобладают  $Y_{\text{связ}}$ .

#### Липиды

Липиды, присутствующие в природных водах, в основном образуются в процессе метаболизма растительных и животных организмов, а также в результате их посмертного разложения. В природных водах они находятся преимущественно в составе автохтонного ОВ [Зобкова и др., 2015]. Повышенные концентрации липидов ухудшают кислородный режим водоемов, органолептические свойства воды и стимулируют развитие микрофлоры. Снижение содержания липидов в природных водах связано с процессами их ферментативного гидролиза и биохимического окисления.

Нами обнаружено, что содержание липидов в исследуемых объектах изменялось в пределах от 0,04 до 0,28 мг/л (в среднем 0,16 мг/л). В придонном горизонте их количество больше, чем в поверхностном, за исключением Петрозаводской губы в весенний период (см. табл. 1).

Сезонное распределение липидов имеет свои особенности, которые связаны с продуцированием ОВ в водных объектах. В зимний и осенний периоды, когда практически отсутствует продуцирование ОВ, наблюдается наименьшее их количество (0,04–0,10 мг/л) в Центральном плесе Онежского озера и Петрозаводской губе (см. табл. 1). Весной происходит резкое увеличение концентрации липидов в 2 раза. Такая особенность связана с тем, что фитопланктон, в котором содержание общих липидов может достигать 44 % в расчете на сухую массу, в это время года в основном представлен диатомовыми водорослями (98 % от общей численности) [Раймонд, 1988].

#### Белки

Белки наряду с углеводами и липидами являются главными составляющими автохтонного ОВ. Источник их поступления в водоемы – прижизненные выделения водных организмов, а также хозяйственно-бытовые сточные воды.

Проведенные исследования, показали, что содержание белков в Онежском озере изменялось в пределах от 0,02 до 0,13 мг/л (в среднем 0,06 мг/л), в р. Шуе – 0,06–0,21 мг/л (в среднем 0,14 мг/л) (см. табл. 1).

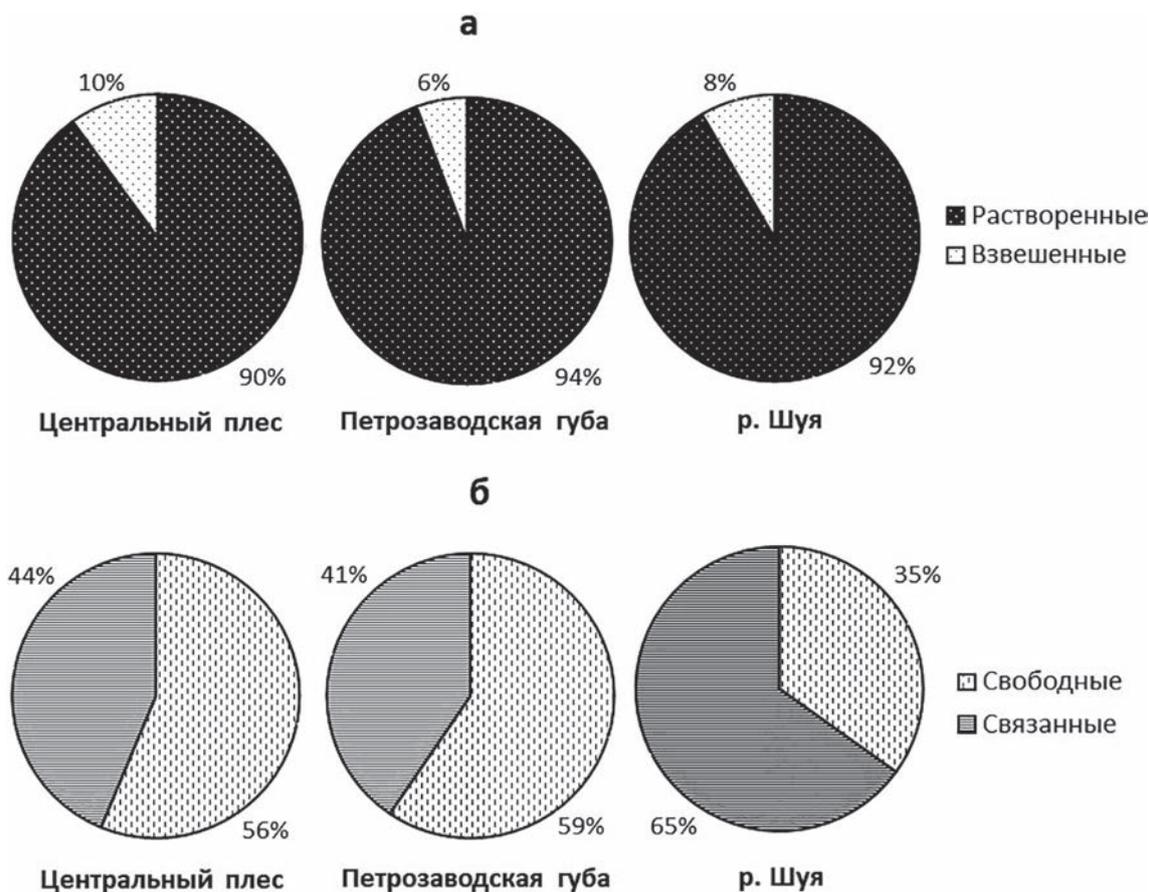


Рис. 3. Соотношение растворенных и взвешенных углеводов в составе общих углеводов (а) и свободных и связанных углеводов в составе растворенных углеводов (б) (средние значения по сезонам и горизонтам)

Fig. 3. Ratio of dissolved and suspended carbohydrates in composition of total carbohydrates (а) and free and related carbohydrates in composition of dissolved carbohydrates (б) (season and horizon mean values)

Анализ сезонной динамики содержания белков показал, что наибольшее их количество отмечается в воде Центрального плеса и Петрозаводской губы осенью, а в р. Шуе – зимой: 0,13 и 0,21 мг/л соответственно, что в 3,5 раза выше, чем весной. Сезонное распределение белков наиболее подробно исследовалось в Онежском озере в 2011 и 2014 гг. [Сабылина и др., 2017]. В более теплый и продуктивный 2011 г. средняя концентрация белков в открытый период года в Онежском озере равнялась 0,21 мг/л, а в холодный и дождливый 2014 г. она была в два раза меньше, что согласуется с полученными данными в 2016–2017 гг.

#### Мочевина

Мочевина присутствует в природных водах и является важным продуктом жизнедеятельности водных организмов. Повышение ее концентрации может указывать на загрязнение водного объекта сельскохозяйственными и хо-

зяйственно-бытовыми сточными водами. Оно обычно сопровождается активизацией процессов утилизации мочевины водными организмами и потреблением кислорода, приводящего к ухудшению кислородного режима.

В 2017 г. было определено содержание мочевины зимой в воде р. Шуи (0,03 мг/л) и весной в центральной части Онежского озера (0,02 мг/л в поверхностном и 0,09 мг/л в придонных горизонтах). Наименьшие ее концентрации в Онежском озере обычно отмечаются в зимний период, а наибольшие – в летне-осенний [Рыжаков, Кукконен, 2014]. По незначительному содержанию мочевины на исследованных участках Онежского озера можно сделать вывод об отсутствии серьезно-антропогенного воздействия.

#### Соотношение компонентов в составе ОБ

Анализ количественного содержания основных компонентов ОБ (гумусовых веществ,

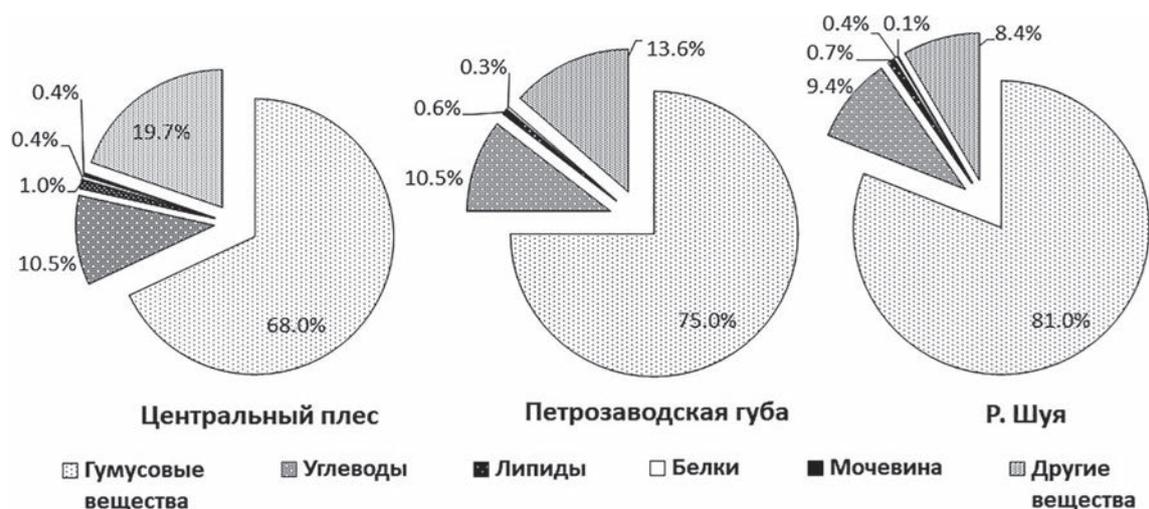


Рис. 4. Среднесезонное содержание основных компонентов органического вещества

Fig. 4. The average seasonal content of main organic matter components

углеводов, липидов, белков и мочевины) в Онежском озере позволил установить их соотношение в составе ОВ в различные сезоны 2016–2017 гг. Как видно из рис. 4, ОВ Онежского озера в основном представлено гумусовыми веществами (68–81 %) и их доля увеличивается с ростом гумусности объекта. В связи с этим наименьшее их количество отмечается в низкогумусном Центральном плесе, а наибольшее – в высокогумусной р. Шуе.

Вторым по количественному содержанию компонентом в составе ОВ являются углеводы, на их долю в среднем приходится 10 %. Значительно меньше содержится липидов (~1 %), белков (~0,4 %) и мочевины (~0,3 %). На другие, неизученные, компоненты ОВ, такие как свободные аминокислоты, нуклеиновые кислоты, летучие органические соединения и др., в среднем приходится 14 % от общего содержания ОВ.

Рассматривая сезонное распределение исследуемых компонентов, удалось выявить следующие закономерности. Наибольшее количество гумусовых веществ в составе ОВ наблюдалось зимой: в Центральном плесе оно достигало 83 %, в Петрозаводской губе – 80 % и в р. Шуе – 90 %, что связано с практически полным отсутствием продукционных процессов в указанный период (рис. 5). При этом сезонная динамика содержания гуминовых кислот в составе гумусовых веществ оставалась практически неизменной (~10 %) (см. табл. 1).

Максимальная доля углеводов в составе ОВ отмечалась в осенний период в поверхностном горизонте Центрального плеса Онежского озера (20 %), минимальная – в зимний период в придонном горизонте (5,9 %). Процентное со-

держание белков уменьшалось от осени к весне. Аналогичная картина наблюдалась в Центральном плесе и в отношении липидов (0,8; 0,4; 0,2 % – осень, зима, весна соответственно).

Исследование состава автохтонного и аллохтонного ОВ показало, что основным идентифицированным компонентом автохтонного ОВ являются свободные углеводы, на их содержание в среднем приходится 30 % (рис. 6). В осенний период их доля достигает максимума – 48 %. Возможно, это связано с более активным развитием сине-зеленых водорослей в осенний период по сравнению с зимним и весенним. Известно, что у *Aph. flos-aquae*, представителя сине-зеленых водорослей, концентрация углеводов может достигать в осенний период до 40 % сухой массы [Барашков, 1972].

Другим компонентом в составе автохтонного ОВ являются липиды – в среднем 11 %. Максимальное их содержание было выявлено в зимний период и составило в Центральном плесе Онежского озера 39 %, в Петрозаводской губе – 30 %. В весенний и осенний периоды в этих водных объектах оно не превышало 5 %. Связано это с отсутствием продуцирования ОВ в водоемах и самым низким содержанием автохтонного ОВ в зимний период по сравнению с другими сезонами года, что приводит к доминирующей роли липидов в составе автохтонного ОВ зимой.

Количество белков в автохтонном ОВ изменялось в небольшом диапазоне от 1,1 до 5,6 % (в среднем 3 %) от автохтонного ОВ. Сезонной изменчивости в их содержании не выявлено.

Аллохтонное ОВ представлено в основном гумусовыми веществами, содержание которых оставалось практически неизменным в течение

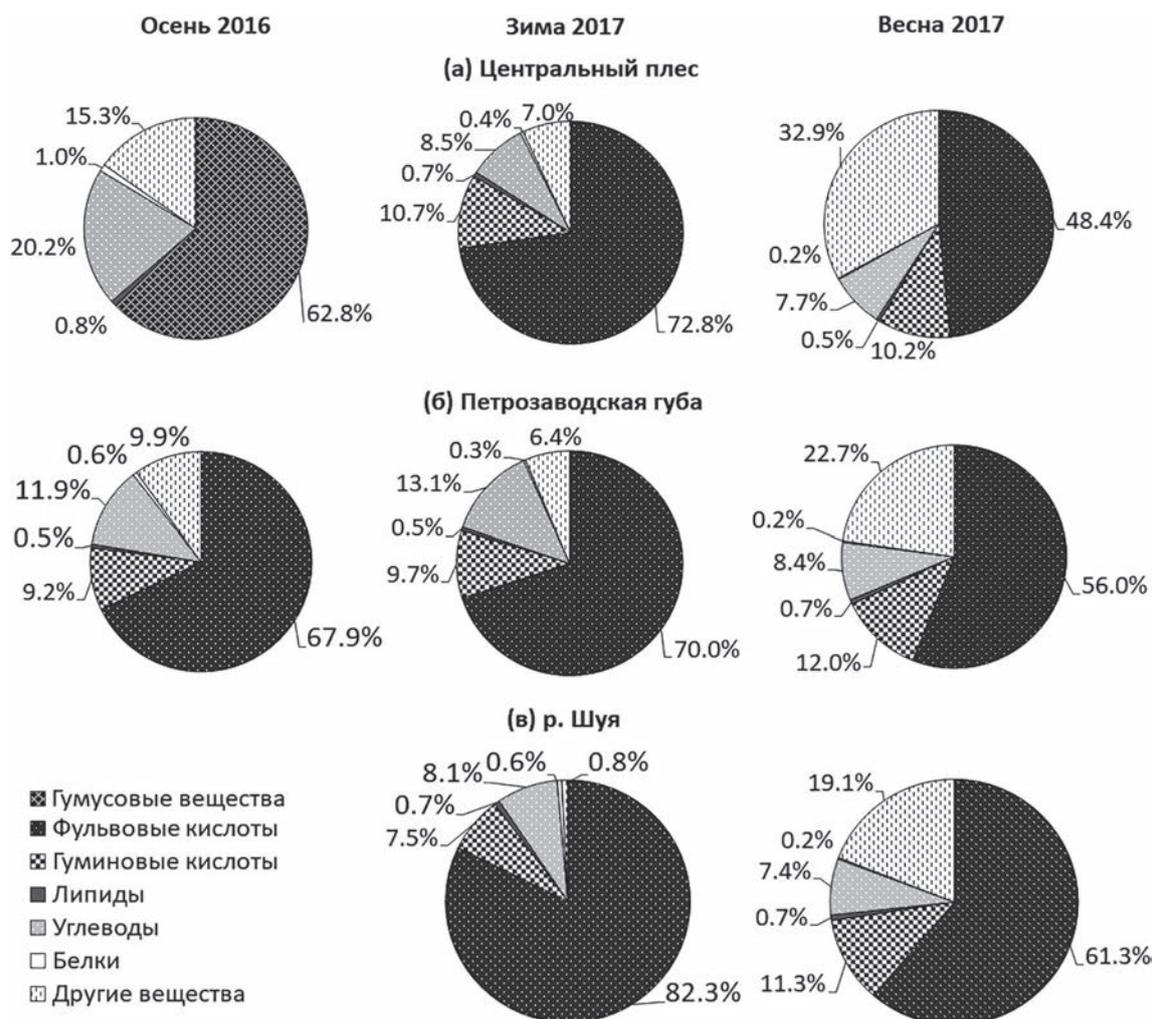


Рис. 5. Соотношение основных компонентов органического вещества в воде Центрального плеса (а), Петрозаводской губы Онежского озера (б) и р. Шуи (в) в различные сезоны 2016–2017 гг.

Fig. 5. Ratio of organic matter main components in water of the central part of Lake Onego (а), Petrozavodsk Bay (б) and the Shuya River (в) in different seasons 2016–2017



Рис. 6. Среднесезонное соотношение компонентов в составе автохтонного органического вещества

Fig. 6. The average seasonal ratio of components in the composition of autochthonous organic matter

всего периода наблюдений. Так, в Петрозаводской губе и в Центральном плесе на их долю приходилось 88 и 90 % соответственно. В составе гумусовых веществ были определены связанные углеводы, доля которых в среднем составляла около 6 %. На всех станциях Онежского озера и р. Шуи преобладали фульвовые кислоты: в поверхностном слое 79–92 % от общего количества гумусовых веществ и в придонном – 83–88 %. Концентрация гуминовых кислот была стабильно низкой в течение года, и только в весенний период в губе и устье реки наблюдалось ее небольшое увеличение. Это связано с тем, что гуминовые кислоты интенсивно закрепляются в почвах в виде комплексов с ионами металлов, поэтому для них характерна меньшая растворимость в воде, а значит, поступление с водосборной территории ограничено [Лапин, Красюков, 1986].

## Выводы

Анализ количественного содержания основных компонентов ОВ (гумусовых веществ, углеводов, липидов, белков и мочевины) в Онежском озере позволил установить их соотношение в составе ОВ в различные сезоны 2016–2017 гг. ОВ в Онежском озере в основном представлено гумусовыми веществами (68–81 %). Их изменчивость в составе ОВ в основном зависит от объема поступления с водосборной территории, а также от распределения в толще озерной воды и различных гидрологических условий. В связи с этим их содержание постепенно уменьшается от высокогумусной р. Шуи до низкогумусного Центрального плеса Онежского озера.

Вторым по количественному содержанию компонентом в составе ОВ являются углеводы (10 %), значительно меньше содержится липидов (~1 %), белков (~ 0,4 %) и мочевины (~ 0,3 %). На другие неизученные компоненты ОВ, такие как свободные аминокислоты, нуклеиновые кислоты, летучие органические соединения и др., в среднем приходится 14 % от общего содержания ОВ. Полученные значения лабильных компонентов ОВ на исследованных участках озера свидетельствуют о его хорошей ассимиляционной способности и стабильности экосистемы.

В составе автохтонного ОВ основным идентифицированным компонентом являются свободные углеводы (30 %), значительно меньше выявлено липидов (11 %), белков (3 %) и мочевины (2 %). Аллохтонное ОВ представлено в основном гумусовыми веществами (в Петрозаводской губе – 88 %, в Центральном плесе –

90 %), в составе которых преобладают фульвовые кислоты.

Сезонное изменение концентраций углеводов, липидов и белков связано с особенностями продукционных процессов в водоеме, в то время как содержание гумусовых веществ остается достаточно стабильным в течение всего периода наблюдений.

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

## Литература

Агатова А. И. Органическое вещество в морях России. М.: ВНИРО, 2017. 260 с.

Агатова А. И., Лапина Н. М., Торгунова Н. И. Органическое вещество, его элементарный и биохимический состав в водах российской части Арктического бассейна в современных условиях // *Океанология*. 2011. Т. 51, № 3. С. 450–460.

Агатова А. И., Лапина Н. М., Торгунова Н. А. Органическое вещество Белого моря // *Система Белого моря*. М.: Научный мир, 2012. Т. II. С. 92–548.

Агатова А. И., Лапина Н. М., Торгунова Н. А., Кирпичев К. Б. Биохимические исследования морских экосистем солоноватых вод // *Водные ресурсы*. 2001. Т. 28, № 4. С. 470–479.

Барашков Г. К. Сравнительная биохимия водорослей. М.: Пищ. пром., 1972. 334 с.

Ефремова Т. А., Сабылина А. В., Лозовик П. А. Лабильные органические вещества: углеводы, липиды и белки в Онежском озере // *Труды КарНЦ РАН*. № 6. 2013. С. 96–104.

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*. № 8. 2015. С. 10–15.

Зобкова М. В., Ефремова Т. А., Лозовик П. А., Сабылина А. В. Баланс органического вещества в озерах Карелии // *Озера Евразии: проблемы и пути их решения: Материалы I Междунар. конф. (11–15 сентября 2017 г.)*. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. С. 358–364.

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

*Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 61–67.*

Лапин И. А., Красюков В. И. Содержание гуминовых и фульвокислот в поверхностных водах СССР // Водные ресурсы. 1991. Т. 3. С. 195–199.

Лапин И. А., Красюков В. И. Роль гумусовых веществ в процессах комплексобразования и миграции металлов в природных водах // Водные ресурсы. 1986. № 1. С. 134–145.

Левшина С. И. Гумусовые кислоты в речных водах Приамурья // География и природные ресурсы. 2006. № 2. С. 101–105.

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

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

Лозовик П. А., Мусатова М. В. Методика разделения органического вещества природных вод адсорбцией на диэтиламиноэтилцеллюлозе на автохтонную и аллохтонную составляющие // Вестник МГОУ. Сер. Естественные науки. 2013. № 3. С. 63–68.

Лозовик П. А., Фрейндлиг В. А. Поверхностные воды озерно-речной системы Шуи в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск: Карелия, 1991. 212 с.

Немировская И. А., Артемьев В. А. Взвесь и компоненты органического вещества в поверхностных водах Южного и Атлантического океанов // Океанология. 2013. Т. 53, № 1. С. 42–52. doi: 10.7868/S0030157413010152

Онежское озеро. Экологические проблемы / Ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. 293 с.

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

Раймонд Дж. Планктон и продуктивность океана. Зоопланктон: В 2-х частях. Ч. II / Ред. Дж. Раймонд. М.: Агропромиздат, 1988. Т. 2. С. 223–263.

Руководство по современным биохимическим методам исследования водных экосистем, перспективных для промысла и марикультуры / Ред. А. И. Агатова. М.: ВНИРО, 2004. 123 с.

Рыжаков А. В., Кукконен Н. А. Мочевина в водных объектах гумидной зоны // Экологическая химия. 2014. Т. 23, вып. 1. С. 44–48.

Сабылина А. В. Химический состав воды притоков // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 61–67.

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.

Сабылина А. В., Ефремова Т. А., Рыжаков А. В. Содержание белков в Онежском и Ладожском озерах и реках Свирь и Нева // Экологическая химия. Т. 26, № 2. 2017. С. 79–86.

Шаова Л. Г. Самоочищение природных вод от редуцирующих сахаров: Автореф. дис. ... канд. хим. наук. Новочеркасск, 1971. 29 с.

Aitkenhead-Peterson J. A., McDowell W. H., Neff J. C. Sources, production, and regulation of allochthonous dissolved organic matter inputs to surface waters // Findlay S. E. G., Sinsabaugh R. L. (eds). Aquatic ecosystems: interactivity of dissolved organic matter. San Diego: Academic Press, 2003. P. 25–69.

APHA: Standard methods for the examination of water and wastewater, 1999, by American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.

Bade D. L., Carpenter S. R., Cole J. J., Pace M. L., Kritzbeg E., Van de Bogert M. C., Cory R. M., McKnight D. M. Sources and fates of dissolved organic carbon isotope additions // Biogeochemistry. 2007. Vol. 84. P. 115–129. doi: 10.1007/s10533-006-9013-y

Benner R. Chemical composition and reactivity // Biogeochemistry of marine dissolved organic matter / Ed. D. A. Hansell, C. Carlson. San Diego: Academic Press, 2002. P. 59–90.

Cho B. C., Azam F. Biogeochemical significance of bacterial biomass in the ocean's euphotic zone // Mar. Ecol. Progr. Ser. 1990. Vol. 63. P. 253–259.

Cory R. M., McKnight D. M., Chin Y. P., Miller P., Jaroos C. L. Chemical characteristics of fulvic acids from Arctic surface waters: microbial contributions and photochemical transformations // J. Geophys. Res. Biogeosci. 2007. Vol. 112. G04s51. doi: 10.1029/2006JG000343

Curtis P. J. Climatic and hydrologic control of DOM concentration and quality in lakes // Aquatic humic substances: ecology and biogeochemistry / Eds. D. O. Hessen, L. J. Tranvik. 1998. P. 93–105.

Kim B. K., Lee S. H., Ha S. Y., Jung J., Kim T. W., Yang E. J., Jo N., Lim Yu J., Park J., Lee S. H. Vertical distributions of macromolecular composition of particulate organic matter in the water column of the Amundsen Sea Polynya during the summer in 2014 // J. Geophys. Res. Oceans. 2018. P. 123. doi: 10.1002/2017JC013457

Liebezeit G. Particulate carbohydrate fluxes in the Bransfield Strait and the Drake Passage // Mar. Chem. 1987. Vol. 20. P. 255–261.

Linnik P. N., Ivanechko Ya. S., Linnik R. P., Zhezherya V. A. Humic substances in surface waters of the Ukraine // Russ. J. Gen. Chem. 2013. Vol. 83, no. 13. P. 2715–2730. doi: 10.1134/S1070363213130185

McKnight D. M., Aiken G. R. Sources and age of aquatic humus // Aquatic Humic Substances: Ecology and Biogeochemistry / Eds. Hessen D. O., Tranvik L. J. Berlin: Springer-Verlag, 1998. P. 9–40.

Rocker D., Kisand V., Scholz-Böttcher B., Kneib T., Lemke A., Rullkotter J., Meinhard S. Differential decomposition of humic acids by marine and estuarine bacterial communities at varying salinities // Biogeochemistry. 2012. Vol. 111. P. 331–346. doi: 10.1007/s10533-011-9653-4

Sellner K. G. Primary productivity and the flux of dissolved organic matter in several marine environments // Mar. Biol. 1981. Vol. 65. P. 101–106.

Xenopoulos M. A., Lodge D. M., Frenress J., Kreps T. A., Bridgham S. D., Grossman E., Jackson C. J. Regional comparison of watershed determinants of dissolved organic carbon in temperate lakes from the Upper Great Lakes region and selected regions globally

// Limnol. Oceanogr. 2003. Vol. 48. P. 2321–2334. doi: 10.4319/lo.2003.48.6.2321

Поступила в редакцию 05.03.2019

## References

Agatova A. I. Organicheskoe veshchestvo v moryakh Rossii [Organic matter in the seas of Russia]. Moscow: VNIRO, 2017. 260 p.

Agatova A. I., Lapina N. M., Torgunova N. A. Organicheskoe veshchestvo Belogo morya [Organic matter of the White Sea]. *Sistema Belogo morya* [System of the White Sea]. Moscow: Nauchnyi mir, 2012. Vol. II. P. 92–548.

Agatova A. I., Lapina N. M., Torgunova N. A., Kirpichev K. B. Biokhimicheskie issledovaniya morskikh ekosistem solonovatykh vod [Biochemical studies of brackish marine ecosystems]. *Vodnye resursy* [Water Res.]. 2001. Vol. 28, no. 4. P. 470–479.

Agatova A. I., Lapina N. M., Torgunova N. I. Organicheskoe veshchestvo, ego elementarnyi i biokhimicheskii sostav v vodakh rossiiskoi chasti Arkticheskogo basseina v sovremennykh usloviyakh [Elemental and biochemical composition of organic matter in the waters of the Russian sector of the Arctic Basin under the present conditions]. *Okeanologiya* [Oceanology]. 2011. Vol. 51, no. 3. P. 450–460.

Barashkov G. K. Sravnitel'naya biokhimiya vodoroslei [Comparative biochemistry of algae]. Moscow: Pishch. prom., 1972. 334 p.

Efremova T. A., Sabylina A. V., Lozovik P. A. Labil'nye organicheskie veshchestva: uglevody, lipidy i belki v Onezhskom ozere [Labile organic matter: (carbohydrates, lipids and proteins) in Lake Onega]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2013. No. 6. P. 96–104.

Krupneishie ozera-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyaniye i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh 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.

Lapin I. A., Krasyukov V. I. Soderzhanie guminovykh i ful'vokislot v poverkhnostnykh vodakh SSSR [The content of humic and fulvic acids in the surface waters of the USSR]. *Vodnye resursy* [Water Res.]. 1991. Vol. 3. P. 195–199.

Lapin I. A., Krasyukov V. N. Rol' gumusovykh veshchestv v protsessakh kompleksobrazovaniya i migratsii metallov v prirodnykh vodakh [The role of humic substances in the complex formation and migration of metals in natural waters]. *Vodnye resursy* [Water Res.]. 1986. No. 1. P. 134–145.

Levshina S. I. Gumusovye kisloty v rechnykh vodakh Priamur'ya [Humic acids in the Amur River waters]. *Geografiya i prirod. resursy* [Geography and Natural Res.]. 2005. No. 4. P. 42–47.

Lozovik P. A., Efremenko N. A. Analiticheskie, kineticheskie i raschetnye metody v gidrokhimicheskoi praktike [Analytical, kinetic and calculation methods in hydro-

chemical practice]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2017. 272 p.

Lozovik P. A., Frejndling V. A. Poverkhnostnye vody ozerno-rechnoi sistemy Shui v usloviyakh antropogenogo vozdeistviya [The surface waters of the lake-river system of the Shuya under the conditions of anthropogenic impact]. Petrozavodsk: Kareliya, 1991. 212 p.

Lozovik P. A., Morozov A. K., Zobkov M. B., Dukhovicheva T. A., Osipova L. A. Allochthonoe i avtochthonoe organicheskoe veshchestvo v poverkhnostnykh vodakh Karelii [Allochthonous and autochthonous organic matter in the surface waters of Karelia]. *Vodnye resursy* [Water Res.]. 2007. Vol. 34, no. 2. P. 225–237.

Lozovik P. A., Musatova M. V. Metodika razdeleniya organicheskogo veshchestva prirodnykh vod adsorbtsiei na dietilaminoetilsellyuloze na avtokhtonnyu i allochtonnyu sostavlyayushchie [The method of separation of organic matter from natural waters by adsorption on diethylaminoethylcellulose into autochthonous and allochthonous components]. *Vestnik MGOU. Ser. Estestv. nauki* [Vestnik MGOU. Nat. Sci. Series]. 2013. No. 3. P. 63–68.

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

Nemirovskaya I. A., Artem'ev V. A. Vzves' i komponenty organicheskogo veshchestva v poverkhnostnykh vodakh Yuzhnogo i Atlanticheskogo okeanov [Suspension and components of organic matter in the surface waters of the Southern and Atlantic Oceans]. *Okeanologiya* [Oceanology]. 2013. Vol. 53, no. 1. P. 42–52. doi: 10.7868/S0030157413010152

Onezhskoe ozero. *Ekologicheskie problemy* [Lake Onega. Environmental problems]. Eds. N. N. Filatov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1999. 293 p.

Orlov D. S. Gumusovye kisloty pochv i obshchaya teoriya gumifikatsii [Soil humic acids and general theory of humification]. Moscow: MGU, 1990. 325 p.

Raymond J. Plankton i produktivnost' okeana [Plankton and ocean productivity]. Moscow: Agropromizdat, 1988. Zooplankton. Vol. 2(2). P. 223–263.

Rukovodstvo po sovremennym biokhimicheskim metodam issledovaniya vodnykh ekosistem, perspektivnykh dlya promysla i marikul'tury [Manual on modern biochemical methods for studying aquatic ecosystems promising for fishing and mariculture]. Moscow: VNIRO, 2004. 123 p.

Ryzhakov A. V., Kukkonen N. A. Mochevina v vodnykh ob'ektakh gumidnoi zony [Urea in water bodies of the humid zone]. *Ekol. khimiya* [Environmental Chem.]. 2014. Vol. 23(1). P. 44–48.

Sabylina A. V., Efremova T. A., Ryzhakov A. V. Soderzhanie belkov v Onezhskom i Ladozhskom ozerakh i rekakh Svir' i Neva [Protein content in Onego and Ladooga lakes and rivers Svir and Neva]. *Ekol. khimiya* [Environmental Chem.]. 2017. Vol. 26, no. 2. P. 79–86.

Sabylina A. V., Lozovik P. A., Zobkov M. B. Khimicheskii sostav vody Onezhskogo ozera i ego pritokov [Chemical composition of water in Lake Onega and its tributaries]. *Vodnye resursy* [Water Res.]. 2010. Vol. 37, no. 6. P. 717–729.

Shaova L. G. Samoochishchenie prirodnykh vod ot redutsiruyushchikh sakharov [Self-purification of natural waters from reducing sugars]: Summary of PhD (Cand. of Chem.) thesis. Novocheerkassk, 1971. 186 p.

Zobkov M. B., Zobkova M. V. Ustroistvo dlya opredeleniya organicheskogo ugleroda v vode s fotokhimicheskimi persulfatnymi okisleniyami v sisteme nepreryvnogo gazovogo potoka i IK-Fur'e spektrometricheskimi detektirovaniyami [A device for determining organic carbon in water with photochemical persulfate oxidation in a continuous gas flow system and FTIR spectroscopic detection]. *Zavodskaya lab. Diagnostika materialov* [Factory lab. Material diagnostics]. 2015. No. 8. P. 10–15.

Zobkova M. V., Efremova T. A., Lozovik P. A., Sabylina A. V. Balans organicheskogo veshchestva v ozerakh Karelii [Organic matter balance in lakes of Karelia]. *Ozera Evrazii: problemy i puti ikh resheniya: Mat. I Mezhdunar. konf. (11–15 sent. 2017 g.)* [Lakes of Eurasia: problems and solutions. Proceed. 1<sup>st</sup> int. conf. (Sept. 11–12, 2017)]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2017. P. 358–364.

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

Aitkenhead-Peterson J. A., McDowell W. H., Neff J. C. Sources, production, and regulation of allochthonous dissolved organic matter inputs to surface waters. In: Findlay S. E. G., Sinsabaugh R. L. (eds). *Aquatic ecosystems: interactivity of dissolved organic matter*. San Diego, Academic Press, 2003. P. 25–69.

APHA: *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 1999, by American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.

Bade D. L., Carpenter S. R., Cole J. J., Pace M. L., Kritzberg E., Van de Bogert M. C., Cory R. M.,

McKnight D. M. Sources and fates of dissolved organic carbon isotope additions. *Biogeochem.* 2007. Vol. 84. P. 115–129. doi: 10.1007/s10533-006-9013-y

Benner R. Chemical composition and reactivity. *Biogeochem. of marine dissolved organic matter*. Ed. D. A. Hansell, C. Carlson. San Diego: Academic Press, 2002. P. 59–90.

Cho B. C., Azam F. Biogeochemical significance of bacterial biomass in the ocean's euphotic zone. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 1990. Vol. 63. P. 253–259.

Cory R. M., McKnight D. M., Chin Y. P., Miller P., Jaroos C. L. Chemical characteristics of fulvic acids from Arctic surface waters: microbial contributions and photochemical transformations. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2007. Vol. 112. G04s51. doi: 10.1029/2006JG000343

Curtis P. J. Climatic and Hydrologic Control of DOM Concentration and Quality in Lakes. In: *Aquatic Humic Substances: Ecology and Biogeochem.* Eds. D. O. Hessen, L. J. Tranvik. 1998. P. 93–105.

Kim B. K., Lee S. H., Ha S. Y., Jung J., Kim T. W., Yang E. J., Jo N., Lim Yu J., Park J., Lee S. H. Vertical distributions of macromolecular composition of particulate organic matter in the water column of the Amundsen Sea Polynya during the summer in 2014. *J. Geophys. Res. Oceans.* 2018. 123 p. doi: 10.1002/2017JC013457

Liebezeit G. Particulate carbohydrate fluxes in the Bransfield Strait and the Drake Passage. *Mar. Chem.* 1987. Vol. 20. P. 255–261.

Linnik P. N., Ivanechko Ya. S., Linnik R. P., Zhezherya V. A. Humic substances in surface waters of the Ukraine. *Russ. J. Gen. Chem.* 2013. Vol. 83, no. 13. P. 2715–2730. doi: 10.1134/S1070363213130185

McKnight D. M., Aiken G. R. Sources and age of aquatic humus. In: *Aquatic Humic Substances: Ecology and Biogeochem.* Eds. D. O. Hessen, L. J. Tranvik. 1998. P. 9–40.

Rocker D., Kisand V., Scholz-Böttcher B., Kneib T., Lemke A., Rullkotter J., Meinhard S. Differential decomposition of humic acids by marine and estuarine bacterial communities at varying salinities. *Biogeochem.* 2012. Vol. 111. P. 331–346. doi: 10.1007/s10533-011-9653-4

Sellner K. G. Primary productivity and the flux of dissolved organic matter in several marine environments. *Mar. Biol.* 1981. Vol. 65. P. 101–106.

Xenopoulos M. A., Lodge D. M., Frenness J., Kreps T. A., Bridgham S. D., Grossman E., Jackson C. J. Regional comparison of watershed determinants of dissolved organic carbon in temperate lakes from the Upper Great Lakes region and selected regions globally. *Limnol. Oceanogr.* 2003. Vol. 48. P. 2321–2334. doi: 10.4319/lo.2003.48.6.2321

Received March 05, 2019

## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

### **Ефремова Татьяна Алексеевна**

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: efremova.nwpi@mail.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

## **CONTRIBUTORS:**

### **Efremova, Tatyana**

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

### **Zobkova, Mariya**

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

УДК 556.114:556.55 (470.22)

## ИЗМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДЫ ОЗЕРА МУНОЗЕРО (КАРЕЛИЯ) ЗА ПОСЛЕДНИЕ 60 ЛЕТ

**А. В. Сабылина, О. И. Икко**

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

Проведен анализ изменения химического состава воды в олиготрофном оз. Мунозеро за период с 1959 по 2019 г. Озеро находится в верхней части Кончезерской озерно-речной системы (Мунозеро, Пертозеро, Габозеро, Кончезеро, Укшезеро). Кончезерская группа озер входит в число уникальных озер Карелии. Из всех озер этой группы оз. Мунозеро выделяется высокой минерализацией (100 мг/л), малым содержанием органических ( $C_{\text{орг}} = 2\text{--}4$  мг/л) и биогенных веществ. Для его вод характерны низкие величины цветности (20–30 град) и высокие значения прозрачности (4–5 м). По питьевым качествам воды это один из лучших водоемов Карелии. В данной работе показаны изменения, произошедшие за 60 лет в ионном составе воды, в содержании биогенных веществ и кислородном режиме в результате влияния как естественных (изменение климата), так и антропогенных факторов.

**Ключевые слова:** минерализация; ионный состав; органические и биогенные вещества; кислород; диоксид углерода; pH воды.

### **A. V. Sabylina, O. I. Ikko. CHANGES IN THE CHEMICAL COMPOSITION OF LAKE MUNOZERO (KARELIA) WATER OVER THE PAST 60 YEARS**

The article presents an analysis of changes in the chemical composition of water in the oligotrophic Lake Munozero for the period from 1959 to 2019. The lake is located in the upstream part of the Konchezero lake-river system (Munozero, Pertozero, Gabozero, Konchezero, Ukshezero). The Konchezero group of lakes is among Karelia's unique water bodies. Of all the lakes in this group, Lake Munozero stands out for its high mineralization (100 mg/l) and low content of organic matter ( $C_{\text{org}} = 2\text{--}4$  mg/l) and nutrients. Lake Munozero water features a low color index (20–30 degrees) and high transparency (4–5 m). This lake is one of the best water bodies in Karelia in terms of potable water quality. The article gives an account of the changes that have occurred over the past 60 years in the ionic composition of lake water, the content of nutrients, and the oxygen regime under the impact of both natural (climate change) and anthropogenic factors.

**Keywords:** total dissolved solids; ionic composition; organic matter and nutrients; oxygen; carbon dioxide; water pH.

#### **Введение**

Озеро Мунозеро является верхним звеном в Кончезерской группе озер, расположен-

ной в нижней левобережной части водосбора р. Шуи. На побережье оз. Мунозеро обнаружена древнейшая стоянка человека [Фосс, 1952]. В юго-западной и западной частях водо-

сборной территории озера располагаются ряд населенных пунктов, санаторий «Марциальные воды» и сельскохозяйственные угодья. Озеро используется для водоснабжения, рекреации и для сброса сточных вод. Северная и северо-восточная части бассейна озера и прилегающая акватория входят в состав территории заповедника «Кивач». Южная и юго-западная части водосбора озера и их акватория подвергаются антропогенному воздействию в результате сброса хозяйственно-бытовых сточных вод пос. Марциальные Воды, санаториев «Марциальные воды» и «Дворцы» в систему, сообщающуюся с озером, а также стоков с сельскохозяйственно освоенных территорий. В 2003 г. в северо-восточной части акватории озера построена небольшая форелеводческая ферма. Выращивание товарной форели в садках обогащает воду озера органическими остатками корма форели.

Исследование химического состава воды оз. Мунозеро имеет длительную историю. Первые сведения о гидрохимии озера были получены Бородинской пресноводной биологической станцией [Зеленкова-Перфильева, 1927]. Обобщение материалов по химическому составу воды озера с 1959 по 1987 г. выполнено Н. С. Харкевич [1991а, б]. В 1992 и 2018–2019 гг. нами были также проведены сезонные исследования химического состава воды озера. Эпизодические наблюдения были осуществлены в летние сезоны 1983, 1987, 2004, 2011 гг.

Анализ данных по химическому составу воды оз. Мунозеро основан на сравнении с литературными данными прежних лет, среди которых особенно ценны материалы сезонных исследований 1959–1960 гг. [Харкевич, 1991а, б]. Это позволило оценить изменения в химическом составе воды, которые произошли в водной экосистеме озера в связи с хозяйственным использованием его бассейна, сбросом сточных вод и другими антропогенными факторами.

## Материалы и методы

Озеро Мунозеро расположено в южной Карелии (62°14' с. ш., 33°49' в. д.) на высоте 74,5 м н. у. м. Площадь водной поверхности – 14,4 км<sup>2</sup>, максимальная глубина – 50 м, средняя – 13,2 м. Озеро имеет семь притоков – это небольшие речки и ручьи, длина которых не превышает 1–3 км. Водоем характеризуется малым объемом годового притока (5–10 м<sup>3</sup>) и замедленным водообменом (15 лет). Мунозеро находится подо льдом 5–6 месяцев, разрушение льда обычно происходит в конце 3-й

декады апреля. В озере в течение всего летнего периода сохраняется устойчивая стратификация температур. Поверхностные слои воды прогреваются до 20–26 °С, в придонных горизонтах температура воды изменяется в пределах 4–6 °С [Поляков, Фрейндлинг, 1991].

Озерная котловина, образовавшаяся в результате денудационно-тектонической деятельности, имеет сложное строение. Максимальные глубины сосредоточены в северной части водоема. Территория водосборного бассейна озера отличается от других озер Кончезерской группы по почвенно-геологическим условиям, особенностью которых является наличие в его бассейне темноцветных плодородных почв (буроземов), основных пород (зеленокаменных сланцев, амфиболитов, габбро-диабазов и карбонатов). Заболоченность водосбора – 3–5 % [Бискэ, 1959; Еруков, Лак, 1985].

Для сравнения данных по химическому составу воды озера, полученных в начале 1960-х годов, с нашими материалами исследований в 1992 и 2018–2019 гг. в озере были выбраны два участка: северо-западный плес (ст. М3) и южный плес (ст. М1) (рис. 1). Эти районы озера отличаются по морфометрии котловины, глубинам и степени антропогенного воздействия.

Химический анализ проб воды выполнялся по методам, изложенным в руководствах [Руководство..., 1977; Аналитические..., 2017].

## Результаты и обсуждение

**Химический состав воды притоков озера.** Все притоки представляют собой небольшие ручьи. Они несут в водоем минерализованные, довольно окрашенные, богатые органическим веществом гумусовой природы воды.

Сумма главных ионов ( $\Sigma_{\text{и}}$ ) в приточных водах в весенний, летний и осенний сезоны 2018 г. изменяется в пределах 66,6–372,2 мг/л. В катионном составе воды ручьев преобладают ионы кальция, в анионном – гидрокарбонаты. Колебания  $\Sigma_{\text{и}}$  в приточных водах значительные. Так, в северном руч. Мустаоя (ст. М6), вытекающем из небольшого оз. Мустлампи, проходящем коротким участком до оз. Мунозеро, амплитуда колебания минерализации воды составила лишь 4 мг/л, в то время как в ручье № 2 (ст. М7), дренирующем зеленокаменные сланцы и карбонатные породы, впадающем в юго-западную часть озера, – 173,8 мг/л (табл. 1).

Анализ произошедших изменений в содержании главных ионов в воде притоков в летние сезоны с 1983 и 1987 по 1992 и 2018 гг. возможен только на примере трех притоков – Мустаоя, Утокоя и Редуоя. По сравнению с 80-ми го-



Таблица 1. Минерализация ( $\Sigma_{и}$ ), показатели содержания органического вещества и взвешенных веществ в воде притоков оз. Мунозеро в весенний, летний и осенний периоды 2018 г.

Table 1. Mineralization ( $\Sigma_{и}$ ), indicators of organic and suspended matter content in the water of the Lake Munozero tributaries in spring, summer, and autumn of 2018

Притоки Tributaries of Lake Munozero	Дата отбора Sampling date	$\Sigma_{и}$ , мг/л $\Sigma_{и}$ , mg/l	Цветность, град. Color, degrees	ПО	ХПК	$C_{орг}$ , мг/л $C_{орг}$ , mg/l	ПО/ХПК, % PO/COD, %	БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /л BOD <sub>5</sub> , mgO <sub>2</sub> /l	Взвешенные вещества, мг/л Suspended matter, mg/l
				РО	COD				
Северный приток (М6) Northern tributary	17.05.18	72,2	64	10,8	31,3	11,4	34	1,66	2,4
	25.07.18	72,1	53	10,1	28,3	10,6	36	1,05	1,6
	25.09.18	76,1	63	11,7	33,7	12,6	35	3,84	2,0
Приток восточного побережья (М8) East coast tributary	17.05.18	78,1	118	18,3	40,6	15,2	45	0,53	2,4
	25.07.18	107,9	118	18,8	49,2	18,5	38	1,25	6,0
	25.09.18	167,5	60	10,7	44,0	19,2	24	2,53	4,2
Приток западного побережья (М7) West coast tributary	17.05.18	258,3	146	22,2	54,7	20,5	41	1,54	3,8
	25.07.18	198,9	124	21,1	57,3	21,5	37	0,95	1,4
	25.09.18	372,7	99	20,0	55,1	20,7	36	3,55	0,4
Приток южного побережья Редуоя (М11) South coast tributary (Reduoya)	17.05.18	98,9	44	7,7	23,1	8,7	33	1,89	1,6
	25.07.18	120,3	42	5,6	24,8	9,3	23	1,62	4,5
	25.09.18	157,3	68	13,5	42,5	16,0	32	7,66	15,1
	07/1983	73	40	9,5	23,4	8,8	41	1,74	-
Приток южного побережья Утокоя (М12) South coast tributary (Utokooya)	17.05.18	66,5	59	9,6	28,3	10,6	34	1,42	2,3
	25.09.18	71,1	41	9,1	24,1	9,0	38	1,93	2,2
	07/1983	69,4	50	8,7	23,4	8,8	37	1,38	-
Исток р. Мунозерка (М4) Source of the Munozerkka River	17.05.18	94,6	10	4,1	12,3	4,6	33	0,72	0,8
	25.07.18	96,5	11	3,3	13,2	4,9	25	0,91	2,2
	25.09.18	98,3	7	3,9	12,4	4,6	31	1,77	2,2
	07/1983	97,6	7	3,2	11,2	4,2	29	0,70	-

Таблица 2. Минерализация и ионный состав воды в некоторых притоках оз. Мунозеро в летний сезон 1987 и 2018 гг., мг/л

Table 2. Values of mineralization and ionic water composition of some Lake Munozero tributaries in summer seasons of 1987 and 2018, mg/l.

Притоки Tributaries	Год наблюдений Year of observation	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	$\Sigma_{и}$ $\Sigma_{и}$
руч. Мустаоя (М6) Stream Mustaoya	1987	8,0	5,9	0,8	2,4	47,6	6,9	1,0	72,6
	2018	8,9	5,5	0,9	2,6	46,0	7,2	1,1	72,2
руч. Редуоя (М11) Stream Reduoya	1987	14,0	6,7	1,1	3,4	71,9	6,6	1,3	105,0
	2018	15,7	6,9	1,3	6,3	73,8	7,9	8,5	120,4
руч. Утокоя (М12) Stream Utokooya	1987	8,2	4,0	0,9	2,0	52,0	3,9	1,1	72,1
	2018	8,4	4,5	1,0	2,4	49,0	4,6	1,3	71,2

силось содержание ионов хлора – с 1,3 (1987 г.) до 6,3 (1992 г.) и 8,5 (2018 г.) мг/л, и связано это со сбросом хозяйственно-бытовых сточных вод пос. Марциальные Воды, санаториев «Марциальные воды» и «Дворцы». Сточные воды поступают в небольшое оз. Редулампи (0,07 км<sup>2</sup>), из которого с водой руч. Редуоя они поступают в южный плес озера. Эти данные свидетельствуют о неэффективной работе станции биологической очистки сточных вод пос. Марциальные Воды и санатория «Марциальные воды»,

либо сточные воды до момента поступления в оз. Редулампи хлорируются и поступают без очистки в озеро. Так, по данным статотчетности «2ТП-водхоз», концентрация хлоридных ионов в оз. Редулампи в 2015 г. составляла 56,9, а в 2016 г. – 55,6 мг/л. В озеро с водой руч. Редуоя поступило хлоридов соответственно 13,5 и 12,6 т/год.

Высокие показатели содержания ОВ в притоках западного и восточного побережья озера обусловлены заболоченностью бассейнов

Таблица 3. Содержание биогенных элементов в воде притоков в весенний, летний и осенний периоды 2018 г.  
Table 3. Content of biogenic elements in the tributaries' water in spring, summer, and autumn periods of 2018

Притоки Tributaries	Сезон Season	Фосфор, мкг/л Phosphorus, mcg/l		Азот, мгN/л Nitrogen, mgN/l				Fe <sub>общ'</sub> Fe <sub>tot'</sub> mg/l	Si, мг/л mg/l
		P <sub>мин</sub> P <sub>min</sub>	P <sub>общ</sub> P <sub>tot</sub>	N <sub>орг</sub> N <sub>org</sub>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N <sub>общ</sub> N <sub>tot</sub>		
Северный приток (М6) Northern tributary	17.05.18	3	22	0,60	0,02	0,04	0,66	0,18	2,8
	25.07.18	1	17	0,37	0,03	0,01	0,40	0,13	1,8
	25.09.18	3	26	0,37	0,02	0,19	0,58	0,23	1,8
Приток восточного побережья (М8) East coast tributary	17.05.18	23	49	0,78	0,04	0,08	0,9	0,54	2,9
	25.07.18	8	53	0,94	0,01	0,05	1,00	0,86	2,9
	25.09.18	14	27	0,46	0,02	0,01	0,49	0,91	3,9
Приток западного побережья (М7) West coast tributary	17.05.18	19	43	0,99	0,03	1,08	2,10	0,48	3,1
	25.07.18	33	74	0,87	0,05	0,24	1,16	0,45	3,8
	25.09.18	34	81	1,00	0,01	0,14	1,14	0,74	4,4
Приток южного побережья Редуоя (М11) South coast tributary (Reduoya)	17.05.18	45	112	0,69	0,06	0,18	0,94	0,30	3,3
	25.07.18	101	167	0,43	0,04	0,23	0,70	0,20	2,2
	25.09.18	90	295	1,35	0,03	0,02	1,40	1,83	6,0
Приток южного побережья Утокоя (М12) South coast tributary (Utokoja)	17.05.18	2	20	0,57	0,02	0,25	0,84	0,20	2,8
	25.09.18	1	21	0,60	0,01	0,03	0,64	0,10	2,3
Исток р. Мунозерка (М4) Source of the Munozerka River	17.05.18	1	9	0,25	0,01	0,14	0,40	0,05	2,4
	25.07.18	1	11	0,25	0,04	0,01	0,30	0,07	1,9
	25.09.18	1	10	0,49	0,01	0,03	0,53	0,14	1,9

этих притоков, тогда как в воде р. Мустаоя (ст. М6), вытекающей из оз. Мустлампи, содержание ОВ сравнительно низкое в течение всего вегетационного периода (среднесезонная цветность – 60 град., ПО – 10,9 мгО/л) (см. табл. 1). Цветность воды притоков варьирует в широких пределах – 41–146 град., перманганатная окисляемость (ПО) – 5,6–22,2 мгО/л, химическое потребление кислорода (ХПК) – 23,1–57,3 мгО/л (см. табл. 2).

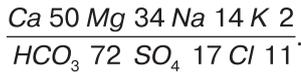
За последние три десятилетия в воде руч. Редуоя величины БПК<sub>5</sub> возросли в период паводков с 1,38 мгО<sub>2</sub>/л в начале 1990-х годов до 7,66 мгО<sub>2</sub>/л в 2018 г. Содержание общего фосфора в воде притоков изменяется в широких пределах: весной – от 22 до 112, а летом и осенью – от 17 до 295 мкг/л (табл. 3). Обращают на себя внимание высокие концентрации P<sub>общ</sub> (112–295 мкг/л) в южном ручье Редуоя (ст. М11), в который поступают сточные воды пос. Марциальные Воды и санатория «Марциальные воды». Содержание общего азота в воде притоков колеблется от 0,40 до 2,10 мгN/л. Максимальные концентрации N<sub>общ</sub> приурочены к притокам западного заболоченного побережья. Органическая форма азота превалирует в воде притоков во все сезоны, минеральные формы азота (NO<sub>3</sub><sup>-</sup> и NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) ассимилируются в наибольшей степени в летний период (см. табл. 3). Концентрация общего железа в воде притоков не превышает 1 мг/л, за исключением южного руч. Редуоя

(1,83 мг/л). Вода ручьев западного и южного побережий обогащена растворенным кремнием, концентрация его в открытый период года в среднем равняется 3,8 мг/л.

Вода всех притоков в открытый период года недонасыщена кислородом (в среднем 60 % насыщения). Низким содержанием кислорода отличаются притоки восточного и южного побережий – Редуоя (10–76 %) и Курий (30–68 %). Величина pH в воде ручьев близка к нейтральной (6,8–7,6). Содержание диоксида углерода в воде притоков высокое и в открытый период года изменяется в широких пределах – от 4,3 до 43,4 мг/л. Максимальная концентрация CO<sub>2</sub> приурочена к осеннему периоду.

**Химический состав воды озера.** Особенности геологического строения, почвенного покрова и в целом характера водосбора оз. Мунозеро обусловили относительно высокую минерализацию его воды. Среднегодовая минерализация в 1959–1960 гг. составляла 92,8 мг/л, колебания средних их величин по сезонам составляли от 87,2 до 99,0 мг/л. Во все сезоны 1992 и 2018–2019 гг. сумма главных ионов равнялась 98,2 и 100,6 мг/л соответственно. При средних колебаниях по сезонам от 94,4 до 116,3 мг/л (табл. 4) минерализация воды в озере начиная с 90-х годов прошлого столетия увеличилась на 6–8 мг/л.

Формула ионного состава воды оз. Мунозеро, выраженная в %-экв, имеет следующий вид:



Как видно из таблицы 4, в катионном составе за 60-летний период заметного изменения концентраций ионов кальция и магния не произошло, увеличилось содержание ионов натрия. Концентрации гидрокарбонатных и сульфатных ионов за многолетний период исследований остались практически постоянными (рис. 2).

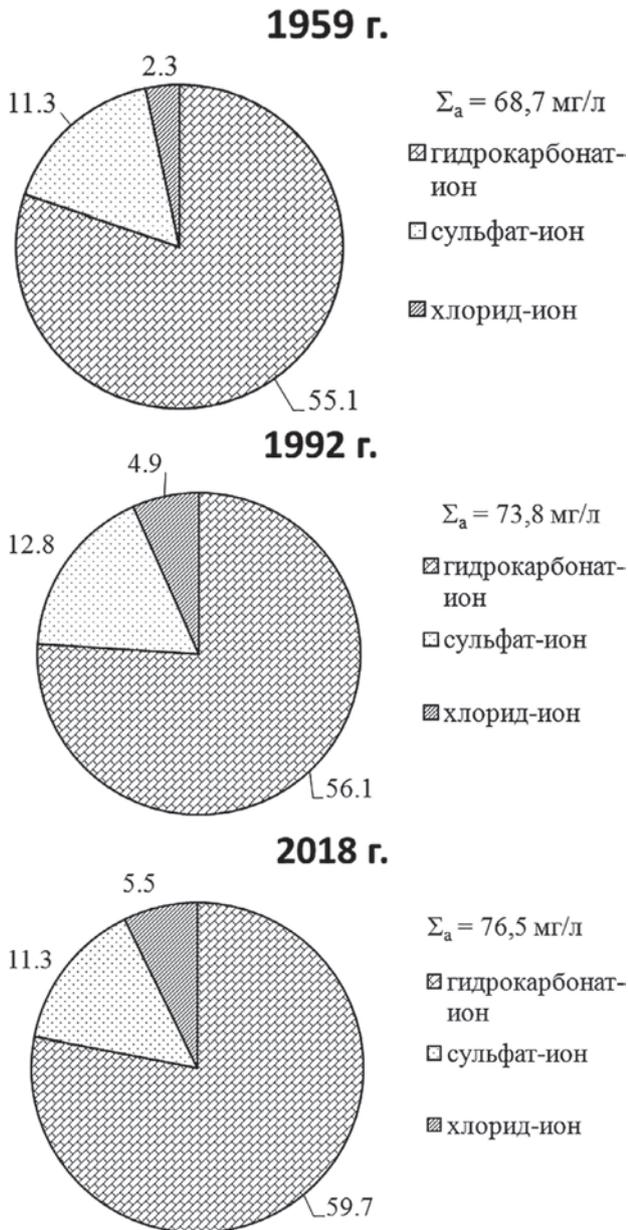


Рис. 2. Динамика изменения средних концентраций гидрокарбонатных, сульфатных и хлоридных ионов ( $\Sigma_a$ ) в воде оз. Мунозеро в течение 1959–1960, 1992 и 2018–2019 гг.

Fig. 2. Dynamic changes in average concentration of hydrocarbonate, sulphate, and chloride ions ( $\Sigma_a$ ) in the water of Lake Munozero in 1959–1960, 1992 and 2018–2019

Однако в анионном составе с 90-х годов прошлого столетия отмечены значительные изменения в содержании хлоридных ионов (см. рис. 2). Это обусловлено поступлением натрия и хлора с хозяйственно-бытовыми сточными водами пос. Марциальные Воды и санатория «Марциальные воды», а также в незначительном количестве от рассеянных источников загрязнения (пос. Спасская Губа, Мунозеро) и сточных вод сельскохозяйственных угодий. Среднегодовая сумма щелочных катионов ( $K^+$  и  $Na^+$ ) в 1959–1960 гг. составила 2,9 мг/л, в 1992 г. она возросла в 1,7 раза, а в 2018–2019 гг. в 2 раза.

Среднегодовая концентрация хлоридных ионов, по данным 1959–1960 гг., равнялась 2,3 мг/л, в 1992 г. она увеличилась в 2 раза, а в 2018–2019 гг. – в 2,5 раза. Различия в содержании ионов хлора по акватории озера незначительные (см. табл. 4). Следует отметить, что поступление хлоридных ионов с атмосферными осадками над территорией исследования низкое (0,39 мг/л), и они не оказывают существенного влияния на увеличение концентрации этих ионов в озере [Потапова, Лозовик, 2007].

Интересно проследить за изменением концентрации катионов щелочных металлов и хлоридных ионов в нижележащем оз. Пертозеро с 1959 по 2004 г. В оз. Пертозеро с юго-восточного побережья впадает р. Мунозерка, а водосборная территория озера не испытывает значительного антропогенного влияния. Среднегодовая сумма катионов щелочных металлов в воде озера в 1959–1960 гг. равнялась 2,3 мг/л, а содержание хлоридных ионов – 1,5 мг/л. По материалам сезонных наблюдений 1992 г. и осенним данным 2004 г., среднегодовая концентрация суммы  $K^+$  и  $Na^+$  составляла 3,7 мг/л, а  $Cl^-$  – 2,9 мг/л, т. е. в воде нижележащего озера изменение содержания этих ионов не произошло.

Для оценки влияния выпуска хозяйственно-бытовых сточных вод в южный плес оз. Мунозеро был проведен статистический дисперсионный анализ (ANOVA) концентрации хлоридных ионов и  $P_{общ}$  в каждом плесе в отдельности. Дисперсионный анализ показал, что разница в концентрации хлоридных ионов до 1990 г. (группа 1) и после 1990 г. (группа 2) является статистически значимой как в озере в целом ( $p = 1,79 \cdot 10^{-32} < 0,001$ ; число степеней свободы  $dF = 51$ ), так и в южном ( $p = 1,32 \cdot 10^{-18} < 0,001$ ;  $dF = 24$ ) и северном ( $p = 6,76 \cdot 10^{-15} < 0,001$ ; число степеней свободы  $dF = 25$ ) плесах в отдельности. Это позволяет утверждать, что увеличение содержания хлоридов в озере после 1990 г. было статистически значимым.

Таблица 4. Минерализация и ионный состав воды оз. Мунозеро (средние по четырем сезонам) в 1959–1960, 1992, 2018–2019 гг. и летом 1983 и 2004 гг., мг/л

Table 4. Values of mineralization and ionic water composition of Lake Munozero (average values for the four seasons) in 1959–1960, 1992, 2018–2019 and in the summer of 1983 and 2004, mg/l

Плес Reach of the lake	Сезон Season	Год наблюдений Year of observation	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	$\sum_{i=1}^n$
Северо-западный North-western reach	Весна Spring	1960	12,9	5,0	2,8		55,0	11,2	2,1	89,0
		1992	13,0	6,0	0,9	3,6	55,6	11,1	4,7	94,9
		2018	12,7	5,1	1,1	4,1	56,2	11,4	5,3	95,9
Южный Southern reach		1960	13,7	5,2	3,0		55,7	11,6	2,2	91,4
		1992	13,4	6,4	0,9	3,9	55,6	15,1	4,9	100,2
		2018	12,7	5,1	1,2	3,8	58,4	10,3	5,2	96,7
Северо-западный North-western reach	Лето Summer	1959	12,1	5,0	2,7		48,7	10,9	2,3	81,7
		1992	13,3	6,2	0,9	3,9	56,9	10,7	4,6	96,5
		2018	13,7	5,6	1,1	4,1	58,3	10,9	5,5	99,2
Южный Southern reach		1959	12,9	5,6	2,9		50,0	11,2	2,3	84,9
		1992	13,4	6,6	1,0	4,0	54,9	11,2	4,8	95,9
		2018	14,2	5,9	1,2	4,3	61,8	11,2	5,2	103,8
Северо-западный North-western reach	Осень Autumn	1959	13,0	5,1	2,7		55,3	11,0	2,4	89,5
		1992	13,1	5,3	1,1	3,8	56,3	11,9	5,5	97,0
		2018	13,4	15,5	1,2	4,1	57,1	12,4	5,6	109,3
Южный Southern reach		1959	13,5	5,4	2,8		56,3	11,5	2,4	91,9
		1992	12,9	6,9	1,0	3,8	55,2	9,8	5,3	94,9
		2018	13,7	5,9	1,2	4,1	58,3	12,3	5,4	100,9
Северо-западный North-western reach	Зима Winter	1960	14,0	5,8	3,0		61,1	11,1	2,2	97,2
		2019	13,8	5,5	1,2	4,5	60,0	11,4	5,7	102,1
Южный Southern reach		1960	14,7	5,9	3,2		59,3	11,9	2,2	97,2
		1992	15,2	6,6	1,5	3,3	58,7	15,0	4,4	104,7
		2019	15,4	5,8	1,3	4,8	67,7	10,7	5,8	111,5
		1983	13,6	6,0	3,5		55,8	16,6	2,4	97,9
Центральный Central reach	Лето Summer	2004	13,6	5,7	1,5	4,6	58,2	13,5	6,6	103,5

Как видно из таблицы 5, величины соотношения Ca<sup>2+</sup> : Mg<sup>2+</sup>, рассчитанные в абсолютных и относительных концентрациях, не изменились за 60-летний период. Они возрастают в воде в период половодья и паводков, а отношение HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> : SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> в эти периоды уменьшается. Величины отношения SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> : Cl<sup>-</sup> по данным 1950–1960 гг. в абсолютных и относительных концентрациях изменялись в пределах 4,9–5,3 и 3,4–4,0 соответственно. В 2018–2019 гг. это отношение уменьшилось в 2,4 раза, что обусловлено возрастанием абсолютных и относительных концентраций ионов хлора (см. табл. 5).

Таким образом, вода оз. Мунозеро, по классификации О. А. Алекина [1970], относится к гидрокарбонатному классу, группе кальция, второму типу, индекс C<sub>II</sub><sup>Ca</sup>. Благодаря сравнительно высокой минерализации и доминированию в ионном составе гидрокарбонатов озеро обладает высокой устойчивостью к процессам

закисления. Однако с 90-х годов прошлого столетия в катионном составе воды отмечено увеличение концентрации ионов натрия, а в анионном составе – значительное увеличение ионов хлора, и связано это со сбросом хозяйственно-бытовых сточных вод пос. Марциальные Воды и санатория «Марциальные воды». Увеличение концентрации такого агрессивного иона, как хлор, может в дальнейшем отрицательно сказаться на жизнедеятельности всей биоты в экосистеме озера, в которой несколько организмов зоопланктона являются реликтовыми [Ильмаст и др., 2008].

В воде оз. Мунозеро содержится очень мало ОВ, и в первую очередь гуминовых веществ. Изменение цветности воды в озере по сезонам и годам связано с водностью соответствующего периода (табл. 6). Цветность воды в начале 60-х годов XX в. колебалась в пределах 5–12 град. Воды в южной части озера были более окрашены, чем в северной. Величины цветно-

Таблица 5. Соотношение между главными ионами (по средним величинам) в воде оз. Мунозеро в 1959–1960 и 2018–2019 гг.

Table 5. The ratio between the main ions (by average values) in the water of Lake Munozero in 1959–1960 and 2018–2019

Сезон Season	Год наблюдений Year of observation	Ca <sup>2+</sup> : Mg <sup>2+</sup>		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : Cl <sup>-</sup>		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> : Cl <sup>-</sup>	
		мг/л mg/l	% экв % equiv	мг/л mg/l	% экв % equiv	мг/л mg/l	% экв % equiv	мг/л mg/l	% экв % equiv
Весна Spring	1960	2,7	1,7	25,3	15,2	4,8	3,8	5,3	4,0
	2018	2,5	1,5	11,0	6,3	5,3	4,3	2,1	1,5
Лето Summer	1959	2,3	1,4	21,7	13,7	4,5	3,6	4,9	3,8
	2018	2,4	1,5	11,1	6,5	5,5	4,3	2,0	1,5
Осень Autumn	1959	2,5	1,5	23,4	13,1	4,9	3,8	4,8	3,4
	2018	2,4	1,4	10,5	6,1	4,7	3,7	2,2	1,7
Зима Winter	1960	2,4	1,5	27,8	16,7	5,5	4,3	5,0	3,8
	2019	2,6	1,6	11,2	6,5	5,6	4,4	2,0	1,5
Средние за 4 сезона 1959–1960 гг. Average values for 4 seasons 1959–1960		2,5	1,5	24,6	14,7	4,9	3,9	5,0	3,8
Средние за 4 сезона 2018–2019 гг. Average values for 4 seasons 2018–2019		2,4	1,5	11,0	6,4	5,3	4,2	2,1	1,6

Таблица 6. Показатели содержания органических (средние по горизонтам) и взвешенных веществ во все гидрологические сезоны в воде оз. Мунозеро в 1992 и 2018–2019 гг.

Table 6. Indicators of organic (average by horizons) and suspended matter content in all hydrological seasons in the water of Lake Munozero in 1992 and 2018–2019

Плес Reach of the lake	Сезон Season	Год наблюдений Year of observation	ЦВ, град. Color, degrees	ПО	ХПК	БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /л BOD <sub>5</sub> , mgO <sub>2</sub> /l	C <sub>орг</sub> <sup>1</sup> , мг/л C <sub>орг</sub> <sup>1</sup> , mg/l	ПО/ХПК, % PO/COD, %	БПК <sub>5</sub> /ХПК, % BOD <sub>5</sub> /COD, %	Взвеш. в-ва, мг/л Susp. matter, mg/l
				РО	КОД					
Северо-западный North-western reach	Весна Spring	2018	13	3,4	13,5	0,69	5,5	25	5	0,8
Южный Southern reach		1992	11	5	-	2,20	4,8	-	-	1,1
		2018	18	4,3	14,9	1,15	5,6	29	8	1,0
Северо-западный North-western reach	Лето Summer	2018	11	3,3	14,5	0,58	5,4	23	4	2,0
Южный Southern reach		1992	10	5,8	-	1,20	5,0	-	-	1,7
		2018	13	3,8	14,5	0,71	5,4	26	5	1,6
Северо-западный North-western reach	Осень Autumn	2018	8	3,1	9,9	0,75	3,7	31	8	0,6
Южный Southern reach		1992	5	8,5	-	1,20	7,6	-	-	0,5
		2018	12	3,8	12,1	1,79	4,5	31	15	1,5
Северо-западный North-western reach	Зима Winter	2019	9	2,7	9,6	0,74	3,6	28	8	0,1
Южный Southern reach		1992	6	3,3	15,7	1,30	5,9	21	8	0,5
		2019	12	3,5	11,0	0,65	4,1	32	6	0,1

сти воды, по данным сезонных исследований в 1992 и 2018–2019 гг., сохранили свое значение (см. табл. 6). Незначительные вариации данного показателя по акватории обусловлены

степенью заболоченности территории южного и восточного водосбора озера, а также масштабным зарастанием литорали южной части водоема высшей водной растительностью на-

Таблица 7. Изменение показателей содержания ОВ в воде оз. Мунозеро в июле 1960, 1968, 1983, 2004 и 2018 гг. (в числителе – поверхностный слой, в знаменателе – придонный)

Table 7. Change in the OS (organic substances) content in the water of Lake Munozero in July 1960, 1968, 1983, 2004 and 2018 (above the line – the surface layer, under the line – the bottom layer)

Район исследования Study area	Год Year	ЦВ, град. Color, degree	ПО, мгО/л PO, mgO/l	ХПК, мгО/л COD, mgO/l	$C_{орг}$ , мг/л $C_{org}$ , mg/l	ОВ, мг/л OM, mg/l	БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /л BOD <sub>5</sub> , mgO <sub>2</sub> /l	ПО/ХПК, % PO/COD, %	БПК <sub>5</sub> /ХПК, % BOD <sub>5</sub> /COD, %
Северный плес (ст. М3) Northern reach (st. M3)	1960	$\frac{5}{6}$	$\frac{3,0}{2,6}$	$\frac{27,6}{25,7}$	$\frac{10,4}{9,6}$	$\frac{21,8}{20,2}$	$\frac{0,98}{0,80}$	$\frac{11}{10}$	$\frac{4}{3}$
	1968	$\frac{9}{9}$	$\frac{3,0}{2,9}$	$\frac{13,1}{12,6}$	$\frac{4,9}{4,6}$	$\frac{10,4}{9,6}$	$\frac{0,70}{0,56}$	$\frac{23}{22}$	$\frac{5}{4}$
	1983	$\frac{7}{8}$	$\frac{3,6}{3,2}$	$\frac{13,0}{12,0}$	$\frac{4,9}{4,2}$	$\frac{10,3}{9,9}$	$\frac{1,38}{0,90}$	$\frac{24}{23}$	$\frac{13}{9}$
	2018	$\frac{11}{11}$	$\frac{4,0}{2,6}$	$\frac{14,7}{13,6}$	$\frac{5,5}{5,1}$	$\frac{11,6}{10,7}$	$\frac{1,62}{0,98}$	$\frac{27}{19}$	$\frac{11}{7}$
	2004	$\frac{16}{14}$	$\frac{3,1}{2,7}$	-	-	-	$\frac{0,9}{0,6}$	-	-
Южный плес (ст. М1) Southern reach (st. M1)	1960	$\frac{7}{8}$	$\frac{3,9}{3,0}$	$\frac{30,0}{28,0}$	$\frac{12}{11}$	$\frac{25,2}{23,0}$	$\frac{1,02}{0,93}$	$\frac{12}{9}$	$\frac{3}{3}$
	1968	$\frac{9}{10}$	$\frac{3,8}{3,2}$	$\frac{15,8}{14,5}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{12,6}{10,2}$	$\frac{1,23}{0,96}$	$\frac{24}{22}$	$\frac{8}{7}$
	1983	$\frac{8}{9}$	$\frac{3,6}{3,2}$	$\frac{14,9}{13,6}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{12,6}{10,2}$	$\frac{1,53}{1,00}$	$\frac{24}{23}$	$\frac{10}{7}$
	2018	$\frac{12}{15}$	$\frac{4,0}{3,7}$	$\frac{15,9}{14,3}$	$\frac{6,0}{5,4}$	$\frac{12,5}{11,3}$	$\frac{1,75}{1,69}$	$\frac{25}{26}$	$\frac{5}{5}$
	2004	$\frac{19}{20}$	$\frac{4,3}{4,7}$	-	-	-	$\frac{0,8}{0,9}$	-	-

чая с 90-х годов прошлого столетия [Фрейндлинг, 1983]. В процессе разложения водной растительности в воду дополнительно поступает значительное количество гуминовых веществ.

В соответствии с низкими величинами цветности невелики и значения перманганатной окисляемости (ПО): по 4 сезонам в 1960 г. они в среднем равнялись 3,1, а в 2018 г. – 3,5 мгО/л. В южной части озера значения ПО чуть выше, чем в северной. С глубиной, особенно на глубоководных участках, они немного снижаются (табл. 7). Значения величин химического потребления кислорода (ХПК) в 2018–2019 гг. превышали значения ПО в 3–4 раза и составляли зимой 8,3–10,8, весной 13,4–16,0, летом 13,2–15,9 и осенью 9,6–13,6 мгО/л. Отношение ПО/ХПК в 1959–1960 гг. в среднем составляло 22 %, в 2018–2019 гг. – 28 %, в летний период 1983 и 2018 гг. – 24 %. В озере в течение года преобладает планктоногенное ОВ. Подтверждением этого являются также низкие величины соотношения БПК<sub>5</sub>/ХПК, которые в озере колеблются от 2 (летом) до 16 (осенью). Среднегодовая концентрация  $C_{орг}$  мало изменяется по годам и сезонам. Так, в 1992 г. она составила 5,8 мг/л, а в 2018–2019 гг. – 5,0 мг/л.

В 2018–2019 гг. величины БПК<sub>5</sub> в северной части озера изменяются в пределах 0,27–0,98

мгО<sub>2</sub>/л, максимальные их значения отмечены в летний сезон на горизонте 8,0 м в районе форелевых садков. Выращивание товарной форели в садках обогащает воду озера легкогидролизуемым органическим веществом (остатки корма форели) и биогенными элементами, что отрицательно сказывается на трофическом состоянии озера. Более того, садки в озере установлены в уязвимой части его акватории, где водообмен и так незначительный.

В южной части озера величины БПК<sub>5</sub> колеблются в пределах 0,69–2,12 мгО<sub>2</sub>/л. В аномально теплую осень 2018 г. в южной части озера величины БПК<sub>5</sub> достигали максимальных значений в году (2,12 мгО<sub>2</sub>/л, ПДК для рыбохозяйственных водоемов составляет 2,0 мгО<sub>2</sub>/л). В этот же период величины БПК<sub>5</sub> в истоке руч. Редуоя, впадающего в южную часть, достигали очень высоких значений и составляли 7,66 мгО<sub>2</sub>/л.

Северный плес озера сохраняет олиготрофный характер, о чем свидетельствуют низкие величины БПК<sub>5</sub> (0,58–0,75 мгО<sub>2</sub>/л), соотношение значений БПК<sub>5</sub>/ХПК (4–8) и соотношение значений ПО/ХПК (22,8–31,3). В южном плесе эти значения выше, что свидетельствует о растущем эвтрофировании этой части озера (см. табл. 7).

Содержание взвешенных веществ в озере невысокое, и по данным 2018–2019 гг. оно

Таблица 8. Содержание биогенных элементов (по средним величинам) в воде оз. Мунозеро во все гидрологические сезоны 1959–1960, 1992, 2018–2019 гг. и в летние периоды 1968, 1983, 2004 гг.

Table 8. The content of biogenic elements (by average values) in the water of Lake Munozero in all hydrological seasons of 1959–1960, 1992, 2018–2019 and in the summer periods of 1968, 1983, 2004

Сезон Season	Год наблюдений Year of observation	Фосфор, мкг/л Phosphorus, mcg/l		Азот, мгN/л Nitrogen, mgN/l				Fe <sub>общ.</sub> мг/л Fe total, mg/l	Si, мг/л mg/l
		P <sub>мин</sub> P <sub>min</sub>	P <sub>общ.</sub> P <sub>total</sub>	N <sub>орг</sub> N <sub>org</sub>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N <sub>общ.</sub> N <sub>total</sub>		
Весна Spring	1960	3	14	0,29	0,08	0,01	0,38	0,00	1,4
	1992	1	6	0,15	0,01	0,16	0,32	0,05	2,4
	2018	1	9	0,16	0,01	0,18	0,31	0,06	2,5
Лето Summer	1960	2	-	0,19	0,08	0,01	0,28	0,01	1,4
	1968	2	18	0,44	0,01	0,03	0,48	0,02	1,3
	1992	1	6	0,19	0,02	0,09	0,30	0,04	2,2
	2004	2	10	0,37	0,03	0,04	0,44	0,03	1,7
	2018	0	10	0,21	0,02	0,08	0,31	0,04	2,3
Осень Autumn	1959	2	16	0,24	0,08	0,02	0,34	0,02	2,0
	1992	1	7	0,20	0,02	0,10	0,32	0,03	2,4
	2018	2	10	0,19	0,02	0,12	0,32	0,04	2,5
Зима Winter	1959	1	9	0,20	0,02	0,01	0,23	0,04	1,9
	1992	2	6	0,17	0,03	0,16	0,36	0,03	2,6
	2019	3	10	0,18	0,03	0,16	0,34	0,04	3,1

составляет 0,6–2,0 мг/л. Максимальные величины отмечены в северной части озера (район форелевых садков). С низкой комплексообразующей способностью вод оз. Мунозеро связано очень малое содержание органических и взвешенных веществ.

В озере летом 1968, 1983, 2004 и 2018 гг. проводилось определение содержания нефтепродуктов. Концентрация их в единичных пробах воды составляла 0,02–0,10 мг/л. Предельно допустимые концентрации нефтепродуктов для питьевых вод и рыбохозяйственных водоемов составляют 0,3 и 0,05 мг/л соответственно.

Как видно из таблицы 7, значения всех показателей содержания ОВ в летний сезон 2018 г. примерно в 1,3–1,5 раза выше, чем в предыдущие годы исследования, что свидетельствует о растущем загрязнении озера лабильными органическими веществами. В будущем это может привести к деградации озерной экосистемы.

Содержание биогенных элементов в водоеме определяется рядом факторов, таких как морфометрия озерной котловины, проточность, величина удельного водосбора, термический и динамический режим водных масс.

С концентрацией двух биогенных элементов – азота и фосфора – тесно связан процесс антропогенного эвтрофирования озер. В оз. Мунозеро в период зимней межени 1960 и 2019 гг. концентрация минерального фосфора в воде низкая (1–3 мкг/л). В период весен-

ней циркуляции водных масс (май) содержание минерального фосфора уменьшается до 1 мкг/л (табл. 8). В летнюю межень потребление минерального фосфора фитопланктоном приводит к полному его исчезновению по акватории озера и во всей водной толще. В осенний паводок наблюдается едва заметное накопление фосфатов вследствие автолиза и гидролиза фитопланктона и высшей водной растительности (см. табл. 8).

Содержание общего фосфора в воде озера в течение многолетнего периода наблюдений изменялось от 9 до 18 мкг/л (см. табл. 8). Среднегодовая концентрация P<sub>общ.</sub> в настоящее время в озере увеличивается. Так, в 1992 г. она равнялась 6 мкг/л, а в 2018–2019 гг. возросла до 10 мкг/л, при этом на долю P<sub>орг.</sub> приходится до 98 %, что свидетельствует о растущей трофии озера.

Два района озера – северный и южный – стали значительно отличаться концентрацией общего фосфора в период летней стагнации и осеннего паводка. Содержание общего фосфора в эти периоды в южной части озера изменяется от 9 до 13 мкг/л (в среднем по вертикали 12 мкг/л), а в северной – от 5 до 9 мкг/л (в среднем по вертикали 8 мкг/л) (табл. 9). Развитию процесса эвтрофирования в южном плесе озера способствуют следующие факторы: мелководность, быстрое весеннее прогревание, а также обогащение его вод биогенными элементами сточных вод и ОВ. Литоральная

Таблица 9. Концентрация биогенных элементов по сезонам 2018–2019 гг.

Table 9. The concentration of biogenic elements for the seasons 2018–2019

Район исследования Study area	Сезон Season	Горизонт, м Horizon, m	Фосфор, мкг/л Phosphorus, mcg/l		Азот, мгN/л Nitrogen, mgN/l				Fe <sub>общ'</sub> мг/л Fe <sub>tot'</sub> mg/l	Si, мг/л mg/l
			P <sub>мин</sub> P <sub>min</sub>	P <sub>общ</sub> P <sub>tot</sub>	N <sub>орг</sub> N <sub>org</sub>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N <sub>общ</sub> N <sub>tot</sub>		
Северный Northern	Весна 2018 г. Spring of 2018	0,5	1	8	0,11	0,01	0,13	0,25	0,05	2,4
		38,0	1	8	0,14	0,01	0,29	0,28	0,04	2,4
Южный Southern		0,5	1	11	0,21	0,01	0,13	0,34	0,07	2,5
		19,0	1	11	0,19	0,01	0,17	0,34	0,07	2,6
<b>Средние Middle</b>	<b>Северный Northern</b>		<b>1</b>	<b>8</b>	<b>0,13</b>	<b>0,01</b>	<b>0,21</b>	<b>0,27</b>	<b>0,05</b>	<b>2,4</b>
	<b>Южный Southern</b>		<b>1</b>	<b>11</b>	<b>0,20</b>	<b>0,01</b>	<b>0,15</b>	<b>0,34</b>	<b>0,07</b>	<b>2,6</b>
Северный Northern	Лето 2018 г. Summer of 2018	0,5	0	9	0,25	0,02	0,01	0,28	0,03	1,9
		8,0	0	9	0,20	0,02	0,01	0,23	0,04	1,9
		37,0	0	9	0,15	0,02	0,17	0,34	0,05	2,5
Южный Southern		0,5	0	9	0,21	0,02	0,01	0,24	0,04	2,1
		10,0	0	11	0,21	0,02	0,04	0,27	0,05	2,2
		18,0	0	13	0,23	0,02	0,24	0,49	0,05	2,9
<b>Средние Middle</b>	<b>Северный Northern</b>		<b>0</b>	<b>9</b>	<b>0,20</b>	<b>0,02</b>	<b>0,06</b>	<b>0,28</b>	<b>0,04</b>	<b>2,3</b>
	<b>Южный Southern</b>		<b>0</b>	<b>12</b>	<b>0,21</b>	<b>0,02</b>	<b>0,10</b>	<b>0,33</b>	<b>0,05</b>	<b>2,6</b>
Северный Northern	Осень 2018 г. Autumn of 2018	0,5	1	8	0,23	0,02	0,01	0,25	0,05	1,9
		30,0	1	5	0,14	0,01	0,27	0,42	0,03	2,6
Южный Southern		0,5	2	13	0,23	0,02	0,02	0,27	0,04	2,3
		18,0	2	13	0,15	0,02	0,18	0,35	0,05	3,0
<b>Средние Middle</b>	<b>Северный Northern</b>		<b>1</b>	<b>6</b>	<b>0,19</b>	<b>0,02</b>	<b>0,14</b>	<b>0,34</b>	<b>0,04</b>	<b>2,4</b>
	<b>Южный Southern</b>		<b>2</b>	<b>13</b>	<b>0,19</b>	<b>0,02</b>	<b>0,10</b>	<b>0,31</b>	<b>0,05</b>	<b>2,7</b>
Северный Northern	Зима 2019 г. Winter of 2019	0,5	1	6	0,13	0,03	0,13	0,29	0,05	2,3
		37,0	3	7	0,13	0,03	0,18	0,29	0,05	2,9
Южный Southern		0,5	2	7	0,15	0,02	0,11	0,28	0,03	2,6
		19,0	4	14	0,28	0,02	0,19	0,49	0,04	4,4
<b>Средние Middle</b>	<b>Северный Northern</b>		<b>2</b>	<b>7</b>	<b>0,13</b>	<b>0,03</b>	<b>0,16</b>	<b>0,29</b>	<b>0,05</b>	<b>2,6</b>
	<b>Южный Southern</b>		<b>3</b>	<b>11</b>	<b>0,22</b>	<b>0,02</b>	<b>0,15</b>	<b>0,39</b>	<b>0,04</b>	<b>3,5</b>

часть плеса в настоящее время плотно заросла высшей водной растительностью, при деструкции которой в воду выделяется ОВ и биогенные вещества.

Поскольку сброс хозяйственно-бытовых сточных вод в оз. Мунозеро начался в середине 1990 г., то все данные по концентрации фосфора были разделены на две выборки: полученные до 1990-х гг. (1) и в последующий период (2). В 1960-х гг. анализ концентрации общего фосфора выполнялся по устаревшей методике, дававшей существенный разброс в результатах анализа, поэтому для анализа изменения содержания фосфора были использованы только данные за 1992 и 2018–2019 гг. В этом случае данные были разделены на две группы по годам: 1992 г. (3) и 2018–2019 гг. (4). В случае с содержанием фосфора это не противоречит исходной гипотезе, поскольку процесс эвтрофирования является постепенным и в начале 1990-х гг. был выражен слабо. Дисперсионный анализ содержания общего фосфора меж-

ду группами (3) и (4) по плесам озера и годам показал следующие результаты. Изменение содержания общего фосфора в северном плесе озера не являлось статистически значимым ( $p = 0,06 \gg 0,001$ ;  $dF = 14$ ), однако в южном плесе оно было таковым ( $p = 1,93 \cdot 10^{-4} < 0,001$ ;  $dF = 15$ ). Это позволяет сделать вывод, что в южном плесе озера происходит статистически значимое увеличение содержания фосфора, однако в северном плесе это изменение пока незначительно. Вместе с тем для озера в целом эта тенденция статистически значима ( $p = 5,20 \cdot 10^{-4} < 0,001$ ;  $dF = 31$ ).

Среднемноголетние концентрации общего азота в воде озера Мунозеро также невысокие и варьируют в пределах 0,23–0,48 мгN/л (см. табл. 8). Преобладающей его формой является органическая. Так, в вегетационный период 1960 г. она составляла в среднем 72, в 2018 г. – 60 %. Убывание концентрации органического азота в сумме общего азота произошло за счет возрастания концентраций нитратов (см.

табл. 8). Максимальное содержание нитратных ионов в открытый период 2018 г. наблюдалось в северном плесе озера (см. табл. 9). Ассимиляция нитратов фитопланктоном в мелководном и более прогреваемом южном плесе озера выше, чем в северном. В период летней температурной стратификации в обоих районах озера отчетливо выражена вертикальная неоднородность содержания нитратов. Разница между его концентрациями в поверхностном и придонном горизонтах воды составила в северном районе 0,01–0,17, в южном – 0,01–0,24 мгN/л. В поверхностных слоях воды ассимиляция нитратных ионов фитопланктоном приводит к почти полному его потреблению по всей акватории озера, что в 1959–1960 гг. отмечалось редко и только в прибрежных частях озера [Харкевич, 1991а]. В 2018 г. в эпилимнионе озера почти полностью отсутствуют минеральные формы фосфора и азота, что обусловлено ассимиляцией их фитопланктоном. Этот процесс следует считать признаком мезотрофии озера (см. табл. 8 и 9).

Соединения азота в оз. Мунозеро также присутствуют преимущественно в органической форме. Концентрация  $N_{\text{орг}}$  весной изменялась от 0,11 до 0,21, летом от 0,15 до 0,25 и осенью от 0,14 до 0,23 мгN/л. Максимальное его содержание обнаружено в южном районе озера в весенний период. Азот минеральный представлен в озере небольшими концентрациями. Содержание аммонийного азота редко превышает 0,02 мгN/л. Нитратный азот в воде озера изменяется от 0,01 до 0,27 мгN/л. Минимальные его количества – 0,01 мгN/л – приурочены к 0–8-метровому слою воды в летний период (см. табл. 9).

Крайне бедна вода озера железом: концентрации его весной равны 0,05–0,07, а летом и осенью – 0,03–0,05 мг/л. Кремния в воде больше: 1,9–3,0 мг/л (см. табл. 9).

Во все сезоны открытого периода года основная толща воды хорошо насыщена кислородом, а в придонных слоях дефицит кислорода высок летом и осенью и составляет соответственно 59 и 48 % насыщения. Весной и летом поверхностные слои воды на 2–6 % перенасыщены кислородом (табл. 10).

Кислородные условия в водоеме являются хорошим индикатором изменения его биопродуктивности. Весенняя циркуляция водных масс в озере происходит при низких температурах воды и охватывает всю толщу. Насыщение ее кислородом довольно равномерное – в среднем 95 %. К моменту установления температурной стратификации озеро обладает хорошим его запасом.

В летний период основными факторами, влияющими на газовый режим озера, являются биологические и биохимические процессы. Относительное содержание кислорода в водной толще в период летней стагнации в настоящее время составляет 38–95 % (см. табл. 10). В прошлом в оз. Мунозеро оно равнялось 65–105 % насыщения [Харкевич, 1991а]. Летом 1959 и 2018 гг. средние значения температуры воды были близкими в 0–10-метровом слое воды и составляли 21,9 и 22,3 °С соответственно, т. е. развитие фотосинтезирующих организмов (фотоавтотрофов) проходило приблизительно в одинаковых температурных условиях. Однако в настоящее время величины рН воды в поверхностных слоях увеличились до 8,23, в прошлом они составляли 7,59. Перенасыщение поверхностных слоев воды кислородом в летний сезон 2018 г. наблюдается по всей акватории озера, что в прошлом было приурочено только к южному его участку. Возможно, это происходит за счет усилившегося фотосинтеза. В эпилимнионе озера (0–10 м) наблюдается полное отсутствие фосфатов и нитратов. Большое количество кислорода расходуется в гипolimнионе озера на деструкцию (минерализацию) новообразованного органического вещества. Абсолютные и относительные концентрации кислорода уменьшились в настоящее время в придонных слоях воды северо-западного плеса с 8,3 (1983 г.) до 7,7 (2018 г.) мг/л и с 66 до 59 % насыщения соответственно. В южном плесе озера абсолютные и относительные концентрации кислорода составляли в этих слоях воды 9,0 (1983 г.) и 4,3 (2018 г.) мг/л и 80 и 38 % насыщения соответственно. Резкое понижение содержания кислорода в придонных слоях южного плеса связано с повышенным окислением (деструкцией) лабильных органических веществ планктоногенного происхождения. В придонных слоях воды наблюдается накопление диоксида углерода до 11,0 в северном плесе и 14,8 мг/л в южном. Ухудшение кислородного режима в придонных слоях в летнее время может привести к заморным явлениям и гибели донных организмов, составляющих основу кормовой базы рыб, а также замене ценных в промысловом отношении рыб (например, сиговых) малоценными видами. Кроме того, дефицит кислорода в гипolimнионе ведет к подавлению активности гетеротрофной микрофлоры, что сопряжено с уменьшением скорости разложения новообразованного органического вещества и накоплением его в донных отложениях.

Осень 2018 г. была аномально теплой. В конце сентября в озере наблюдалась прямая тем-

Таблица 10. Содержание диоксида углерода, кислорода и pH воды в оз. Мунозеро в 2018–2019 гг.

Table 10. Content of carbon dioxide, oxygen, and the pH values of the water in Lake Munozero in 2018–2019

Место отбора Sampling location	Сезон Season	Горизонт, м Horizon, m	pH	CO <sub>2</sub> , мг/л mg/l	O <sub>2</sub> , мг/л mg/l	O <sub>2</sub> , % нас. % of O <sub>2</sub> saturation	T, °C
Северо-западный плес North-western reach	Весна (16.05.18) Spring	0,5	7,74	2,5	10,8	101	13,4
		38,0	7,46	4,8	11,0	83	4,0
Южный плес Southern reach		0,5	7,61	3,7	11,3	106	13,4
		19,0	7,45	5,7	10,5	80	4,5
Северо-западный плес North-western reach	Лето (26.07.18) Summer	0,5	8,09	1,0	8,3	94	23,8
		8,0	7,95	1,5	9,5	92	14,8
		37,0	7,12	11,0	7,7	59	4,5
Южный плес Southern reach		0,5	8,23	0,5	8,4	95	23,6
		10,0	7,35	7,2	6,9	63	12,5
		18,0	7,05	14,8	4,3	38	9,8
Северо-западный плес North-western reach	Осень (25.09.18) Autumn	0,5	7,80	2,8	9,4	89	14,0
		39,0	7,01	14,6	6,3	48	4,5
Южный плес Southern reach		0,5	7,54	4,0	8,7	83	14,2
		18,0	7,09	14,2	2,3	21	11,0
Северо-западный плес North-western reach	Зима (26.02.19) Winter	0,5	7,56	2,53	13,1	89	0,1
		37,0	7,18	7,92	7,0	51	3,0
Южный плес Southern reach		0,5	7,93	2,42	13,0	89	0,1
		19,0	7,24	9,24	3,6	27	3,6

пературная стратификация. Так, в северном плесе температура в поверхностном слое воды равнялась 14,0, в придонном – 4,5 °C. В озере активно шли фотосинтетические процессы. Абсолютные концентрации кислорода в верхнем 5-метровом слое воды в озере составляли 8,7–9,4 мг/л (83–89 % насыщения). В придонных слоях воды северного плеса озера концентрация кислорода равнялась 6,3 мг/л (48 % насыщения), в южном плесе озера она уменьшилась до критической – 2,3 мг/л (21 % насыщения), что может привести к заморным явлениям (см. табл. 10).

Содержание диоксида углерода осенью в придонных слоях воды во всей акватории озера очень высокое и в среднем составляет 14,4 мг/л. В глубоководном районе озера величины pH воды изменяются от 7,80 до 7,01, в мелководном (южном) – от 7,54 до 7,09.

Кислородные условия в зимний период в оз. Мунозеро неблагоприятные. По данным 2019 г., дефицит кислорода в среднем по озеру достигал 36 %, т. е. насыщение составляло 64 %. В южном районе озера (ст. М1) содержание кислорода в поверхностном слое воды составляло 13,0 мг/л (89 % насыщения), в придонном – 3,6 мг/л (27 % насыщения). Содержание диоксида углерода на ст. М1 в поверхностном слое воды составляло 2,4, а в придонном – 9,2 мг/л (см. табл. 10).

Таким образом, в оз. Мунозеро сезонная динамика и вертикальное распределение раство-

ренных газов и величин pH воды за 60-летний период заметно изменились. Наиболее негативное последствие антропогенного воздействия на озеро – это возникновение высокого дефицита кислорода в глубоководных (41 %) и мелководных (62 %) его участках в летний период вследствие увеличения интенсивности процессов деструкции органического вещества.

## Выводы

Экосистема оз. Мунозеро, сформировавшаяся в результате взаимодействия многообразного комплекса природных процессов, развивающихся в водной среде и на водосборе, находится в настоящее время под влиянием антропогенной нагрузки.

Вода озера характеризуется высокой минерализацией (среднегодовой 98,4 мг/л), относится к выраженному гидрокарбонатному классу, группе кальция. Заметные изменения за 60-летний период наблюдений произошли в ионном составе воды озера. Начиная с 1990-х годов наблюдается увеличение хлоридных ионов в 2,5 раза, ионов натрия – в 1,5 раза (по сравнению с 1959–1960 гг.).

В воде оз. Мунозеро содержится очень мало органического вещества, и оно в основном планктоногенное. Цветность воды менее 20 град. Значения перманганатной окисляемости низкие (в среднем 3,6 мг/л). За последние три десятилетия изменения величин перманга-

натной окисляемости стали заметны в южном плесе озера и практически не произошли в северном плесе. Однако почти в 2 раза выросли величины БПК<sub>5</sub>, что свидетельствует об увеличении содержания биохимически легкоокисляемых ОБ, и их увеличение обусловлено поступлением в озеро загрязняющих веществ.

Концентрация общего фосфора в водоеме до начала 1990-х годов в среднем составляла 9 мкг/л, в настоящее время – 11 мкг/л. В южной части озера, где водообмен низкий, концентрация Р<sub>общ</sub> не изменяется во времени и колеблется от 10 до 13 мкг/л. Соединения азота в озере представлены преимущественно органической формой (в среднем 0,24 мгN/л). Среди минеральных форм азота преобладают нитраты (0,10 мгN/л). Железом вода озера крайне бедна.

Начиная с 1992 г. процент насыщения кислородом придонных слоев воды стал снижаться в северном плесе осенью до 48 %, зимой – до 51 %, а в южном плесе до 21 и 27 % соответственно.

Величина рН воды изменяется от нейтральной до слабощелочной (7,01–8,23) в открытый период года. В зимнюю межень в поверхностных слоях воды она составляла 7,56–7,93, у дна – 7,18–7,24.

Увеличение за последние три десятилетия содержания хлоридных ионов и ионов натрия, биохимического потребления кислорода, общего фосфора свидетельствует о загрязнении водоема, что впоследствии может привести к деградации озерной экосистемы.

Учитывая высокое качество воды оз. Мунозеро, своеобразие ее химического состава, а также возрастающее антропогенное воздействие на водосборную территорию и акваторию озера, необходимо принять срочные меры по его охране.

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

## Литература

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

## References

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

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

*Бискэ Г. С. Четвертичные отложения и геоморфология Карелии. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1959. 307 с.*

*Еруков Г. В., Лак Г. Ц. Почвы и почвенный покров денудационно-тектонических ландшафтов Заонежья // Исследования почв лесных ландшафтов Карелии. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1985. С. 5–46.*

*Зеленкова-Перфильева М. К. К гидрохимии Кончезерской группы озер // Тр. Бородинской пресноводной биол. станции Карелии. Л., 1927. Т. V. С. 64–101.*

*Ильмаст Н. В., Китаев С. П., Кучко Я. А., Павловский С. А. Гидроэкология разнотипных озер южной Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 92 с.*

*Меншуткин В. В., Петрова Н. А., Иофина И. В., Петрова Т. Н., Сусарева О. М. Ладожское озеро: теория и реальность. СПб.: Нестор-История, 2015. 76 с.*

*Поляков Ю. К., Фрейндлинг В. А. Общая гидрологическая характеристика бассейна р. Шуя // Поверхностные воды озерно-речной системы Шуи в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1991. С. 25–33.*

*Потапова И. Ю., Лозовик П. А. Характеристика химического состава атмосферных осадков и химических выпадений на территории Карелии // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 174–187.*

*Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / Под ред. А. Д. Семенова. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 542 с.*

*Фосс М. Е. Древнейшая история Севера Европейской части СССР. № 29 (МИА). М.: АН СССР, 1952. 280 с.*

*Фрейндлинг А. В. К вопросу о деструкции макрофитов южной и северной Карелии // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах: Тез. докл. IV всесоюз. симпоз. (Петрозаводск, 3–5 окт. 1983 г.). Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1983. С. 111–114.*

*Харкевич Н. С. Гидрохимия Кончезерской группы озер – уникальных водных объектов Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1991. 126 с.*

*Харкевич Н. С. Гидрохимия Кончезерской группы озер // Поверхностные воды озерно-речной системы Шуи в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1991. С. 80–86.*

*Поступила в редакцию 05.04.2019*

*Analiticheskie, kineticheskie i raschetnye metody v gidrokhimicheskoi praktike [Analytical, kinetic and calculation methods in hydrochemical practice].*

Eds. P. A. Lozovik, N. A. Efremenko. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2017. 272 p.

*Biske G. S.* Chetvertichnye otlozheniya i geomorfologiya Karelii [Quaternary deposits and geomorphology of Karelia]. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR, 1959. 307 p.

*Erukov G. V., Lak G. Ts.* Pochvy i pochvennyi pokrov denudatsionno-tektonicheskikh landshaftov Zaonezh'ya [Soils and soil cover of the denudation-tectonic landscapes in Zaonezhye]. *Issled. pochv lesnykh landshaftov Karelii* [Soil studies of forest landscapes in Karelia]. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR, 1985. P. 5–46.

*Foss M. E.* Drevneishaya istoriya Severa Evropeiskoi chasti SSSR. № 29 (MIA) [Ancient history of the North European part of the USSR. No. 29 (Materials Research Archaeology)]. Moscow: AN SSSR, 1952. 280 p.

*Freindling A. V.* K voprosu o destruktсии makrofitov yuzhnoi i severnoi Karelii [On the question of the macrophytes' destruction in southern and northern Karelia]. *Organicheskoe veshchestvo i biogennye elementy vo vnutrennikh vodoemakh*: Tez. dokl. IV vsesoyuz. simpoz. (Petrozavodsk, 3–5 okt. 1983 g.). [The organic matter and biogenic elements in inland reservoirs: Abs. IV All-Union symp. (Petrozavodsk, Oct. 3–5, 1983)]. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR, 1983. P. 111–114.

*Il'mast N. V., Kitaev S. P., Kuchko Ya. A., Pavlovskii S. A.* Gidroekologiya raznotipnykh ozer yuzhnoi Karelii [Hydroecology of diverse lakes in southern Karelia]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2008. 92 p.

*Kharkevich N. S.* Gidrokimiya Konchezerskoi gruppy ozer – unikal'nykh vodnykh ob'ektov Karelii [Hydrochemistry of the Konchezero group of lakes – unique water bodies in Karelia]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1991. 126 p.

*Kharkevich N. S.* Gidrokimiya Konchezerskoi gruppy ozer [Hydrochemistry of the Konchezero group

of lakes]. *Poverkhnostnye vody ozerno-rechnoi sistemy Shui v usloviyakh antropogennogo vozdeistviya* [The surface waters of the Shuya lake-river system in conditions of anthropogenic impact]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1991. P. 80–86.

*Men'shutkin V. V., Petrova N. A., Iofina I. V., Petrova T. N., Sysareva O. M.* Ladozhskoe ozero: teoriya i real'nost' [Lake Ladoga: theory and reality]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2015. 76 p.

*Polyakov Yu. K., Freindling V. A.* Obshchaya gidrologicheskaya kharakteristika basseina r. Shuya [General hydrological characteristics of the Shuya River basin]. *Poverkhnostnye vody ozerno-rechnoi sistemy Shui v usloviyakh antropogennogo vozdeistviya* [The surface waters of the Shuya lake-river system in conditions of anthropogenic impact]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1991. P. 25–33.

*Potapova I. Yu., Lozovik P. A.* Kharakteristika khimicheskogo sostava atmosferykh osadkov i khimicheskikh vypadenii na territorii Karelii [Characteristics of the chemical composition of precipitation and chemical fallout in Karelia]. *Sostoyanie vodnykh ob'ektov Respubliki Kareliya. Po rezul'tatam monitoringa 1998–2006 gg.* [Status of water bodies in the Republic of Karelia according to the results of the monitoring in 1998–2006]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2007. P. 174–187.

*Rukovodstvo po khimicheskomu analizu poverkhnostnykh vod sushi* [Guidelines for chemical analysis of surface waters]. Ed. A. D. Semenov. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977. 542 p.

*Zelenkova-Perfil'eva M. K.* K gidrokhimii Konchezerskoi gruppy ozer [To the hydrochemistry of the Konchezero group of lakes]. *Tr. Borodinskoi presnovodnoi biol. stantsii Karelii* [Proceed. Borodinskaya freshwater biol. station in Karelia]. Leningrad, 1927. Vol. V. P. 64–101.

Received April 05, 2019

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### **Сабылина Альбина Васильевна**

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

### **Икко Ольга Игоревна**

ведущий химик 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: vos-olga-zenia@yandex.ru

## CONTRIBUTORS:

### **Sabylina, Albina**

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

### **Ikko, Olga**

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

## ГИДРОБИОЛОГИЯ

УДК 574.586

### СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ЭПИФИТОНА В ДВУХ РАЗНОТИПНЫХ ОЗЕРАХ СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ

М. В. Колченко<sup>1</sup>, Е. В. Станиславская<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Государственный научно-исследовательский институт озерного и речного рыбного хозяйства им. Л. С. Берга, Псковское отделение, Россия

<sup>2</sup> Институт озераведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

В вегетационный период 2013 г. была исследована сезонная динамика биомассы и комплексов доминирующих видов эпифитона на тростнике (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud) в высокоэвтрофном Псковско-Чудском озере и мезотрофном оз. Красном. Озера различались по своим морфометрическим, гидрологическим, гидрохимическим параметрам и степени зарастания. Выявлено, что ход сезонной динамики биомассы эпифитона в Псковско-Чудском озере имел три подъема с максимумом в весеннее время, тогда как в оз. Красном наблюдался один летний пик с незначительными подъемами в весеннее и осеннее время. Максимальные пики развития эпифитона в обоих озерах были обусловлены вегетацией диатомовых водорослей. Комплексы доминирующих видов в целом были схожими, особенно в весенний период. Уровень биомассы в озерах одного порядка: в Псковско-Чудском озере биомасса изменялась от 0,8 до 17,8 г/м<sup>2</sup> субстр., в оз. Красном – от 5,0 до 12,2 г/м<sup>2</sup> субстр. Корреляционный анализ показал статистически достоверную связь между сезонной изменчивостью биомассы эпифитона и биомассы фитопланктона в Псковско-Чудском озере, тогда как в оз. Красном такой связи не выявлено. Также при анализе сезонной динамики биомассы эпифитона в обоих озерах не получено достоверных связей с такими гидрологическими факторами, как уровень и температура воды.

Ключевые слова: озера; эпифитон; структура; биомасса; доминирующие виды; абиотические и биотические факторы среды.

**M. V. Kolchenko, E. V. Stanislavskaya. SEASONAL DYNAMICS OF EPIPHYTON IN TWO LAKES OF DIFFERENT TYPES IN NORTHWEST RUSSIA**

The seasonal variation of epiphyton biomass and complexes of dominant species on reed (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud) in highly eutrophic Lake Pskovsko-Chudskoe and mesotrophic Lake Krasnoe was studied during the 2013 growing season. The lakes differ in their morphometric, hydrological, hydrochemical parameters and scope of over-

growth. It was found that the seasonal epiphyton biomass pattern in Lake Pskovsko-Chudskoe had three peaks with a maximum in springtime, whereas Lake Krasnoe had one summertime peak with minor rises in spring and autumn. Maximum epiphyton development peaks in both lakes were due to diatom growth. The dominant species complexes were generally similar, especially in spring. Biomass levels were of the same magnitude in both lakes: biomass in Lake Pskovsko-Chudskoe ranged from 0.8 to 17.8 g/m<sup>2</sup> of substrate, and the range in Lake Krasnoe was from 5.0 to 12.2 g/m<sup>2</sup> of substrate. Correlation analysis revealed a significant relationship between seasonal variations of epiphyton biomass and phytoplankton biomass in Lake Pskovsko-Chudskoe, while in Lake Krasnoe no such correlation was found. The analysis of the seasonal variation of epiphyton biomass revealed no correlation with water level or water temperature on either lake.

**Key words:** lakes; epiphyton; structure; biomass; dominant species; abiotic and biotic environmental factors.

## Введение

Эпифитон – сообщества прикрепленных водорослей, развивающихся на высшей водной растительности, – является важной составной частью автотрофного звена водных экосистем различных водоемов. Он играет существенную роль в создании и трансформации органического вещества, участвует в процессах самоочищения, служит пищей для организмов последующих звеньев трофической цепи. В процессе своего развития эпифитонные комплексы претерпевают изменения, которые обусловлены различными абиотическими и биотическими факторами, что отражается в их временных и пространственных сукцессиях. Среди абиотических факторов большое значение имеют морфометрические (размер водоема, соотношение максимальной и средних глубин), гидрологические (температура, уровень воды, волновые воздействия) и гидрохимические (биогенные элементы, органические вещества) характеристики водоемов, а также климатические условия региона [Рычкова, 1986; Распопов и др., 1990; Hansson, 1992; Комулайнен, 2004 и др.]. К существенным биотическим факторам можно отнести степень зарастания водоема, плотность и темпы развития макрофитов, текстурные особенности растений и их морфологические особенности [Cattaneo, Kalff, 1979; Девяткин, 2003 и др.].

Другим существенным биотическим фактором, влияющим на формирование обрастаний, являются динамика и уровень развития фитопланктона в водоемах, что обусловлено наличием конкурентных взаимоотношений между автотрофными планктонными и прикрепленными сообществами [Hansson, 1988 и др.]. Установлено, что при массовом развитии фитопланктона динамика эпифитона может быть «противофазна» [Метелева, 2013], а может проследиваться тенденция синхронного изменения их количественных показателей [Касперовичене,

Каросене, 2005 и др.]. Взаимодействие всех перечисленных факторов в целом определяет видовой состав, количественное развитие и сезонную динамику эпифитона в водоемах.

Таксономический состав, массовые виды и количественные характеристики эпифитона Псковско-Чудского озера достаточно хорошо изучены, однако сезонных наблюдений на тростнике ранее не проводилось [Судницына, 2008; Колченко, 2013, 2016 и др.]. Структурно-функциональные характеристики и сезонная динамика эпифитона в оз. Красном также хорошо изучены [Басова, 1976; Станиславская, 2008].

В вегетационный период 2013 г. были исследованы структура и количественные показатели сообществ эпифитона, развивающихся на тростнике южном (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud) в высокоэвтрофном Псковско-Чудском озере и мезотрофном оз. Красном.

Основной целью исследования было выявление особенностей сезонной динамики биомассы и ее уровня, а также доминирующих видов водорослей эпифитона в разнотипных озерах в зависимости от некоторых абиотических и биотических факторов среды (температура и уровень воды, интенсивность вегетации фитопланктона).

## Материал и методы

Исследования проводили на двух озерах разного типа, расположенных на Северо-Западе России (рис. 1). Псковско-Чудское озеро по площади водной поверхности принадлежит к числу наиболее крупных пресноводных водоемов Европы. Расположенное на границе России и Эстонии, оно относится к бассейну Финского залива Балтийского моря и соединяется с ним короткой (77 км) рекой Нарвой. Площадь водосбора в истоке р. Нарвы, включая площадь самого водоема, равна 47 800 км<sup>2</sup>. Озеро вытя-

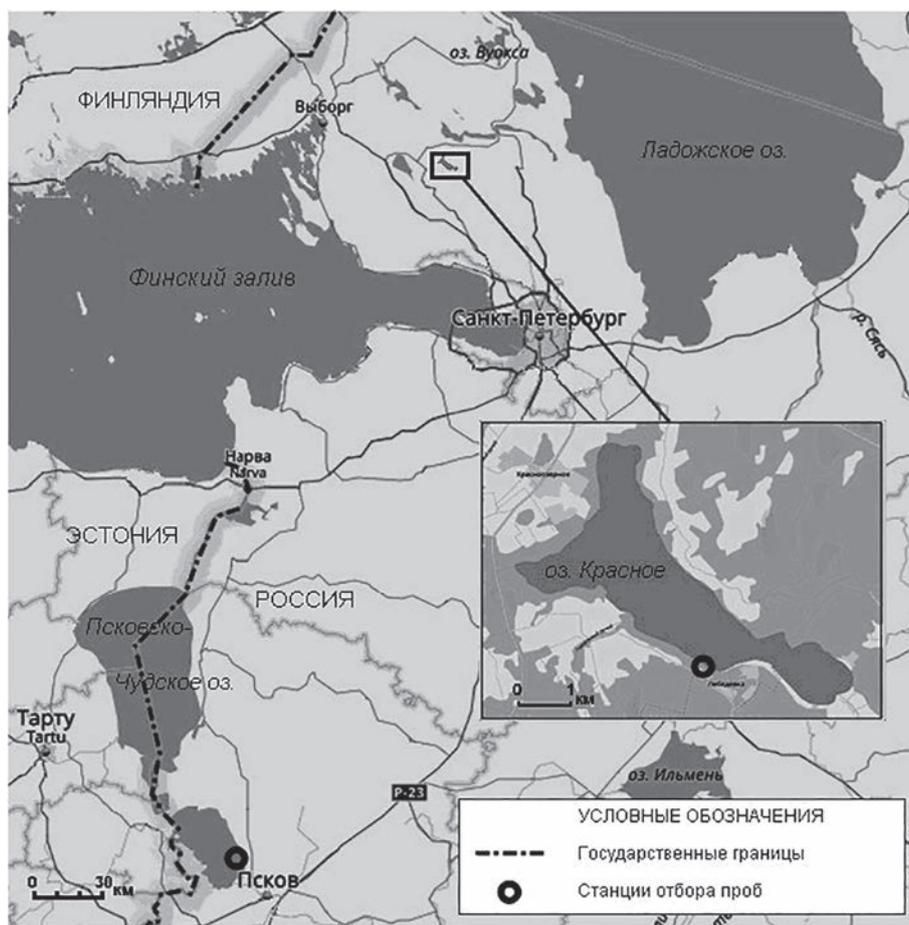


Рис. 1. Карта-схема района исследований и расположение станций отбора проб

Fig. 1. Schematic map of the study area and sampling station

нуто в меридиональном направлении и состоит из трех частей (озер), различающихся по ряду лимнологических показателей: северной – Чудское озеро (площадь 2613 км<sup>2</sup>, средняя глубина 8,3 м), южной – Псковское (709 км<sup>2</sup> и 3,8 м) и соединяющего их пролива – Теплое озеро (236 км<sup>2</sup> и 2,5 м). Площадь зеркала озера в целом изменяется в зависимости от уровня воды от 3473 до 4328 км<sup>2</sup> (в среднем – 3558 км<sup>2</sup>). Наибольшая длина озера – 152 км, максимальная ширина – 47 км, максимальная глубина – 15,3 м [Псковско-Чудское..., 2012]. Трофический статус водоема определяется как высокоэвтрофный [Ястремский, 2011].

Озеро Красное относится к бассейну реки Вуоксы и расположено в центральной части Карельского перешейка (Ленинградская область). Юго-восточная часть его водосбора находится в пределах центральной возвышенности Карельского перешейка, а северо-западная часть – в пределах террасированных равнин. Площадь водосбора озера составляет 168 км<sup>2</sup>. Площадь зеркала озера 9,13 км<sup>2</sup>, дли-

на 6,9 км, максимальная ширина – 3,0 км, максимальная глубина – 12 м. Сток из озера осуществляется по реке Красной, которая впадает в озеро Правдинское. Трофический статус водоема определяется как мезотрофный с чертами эвтрофии [Многолетние..., 2008].

Исследованные озера различались как по своим морфометрическим характеристикам, гидрохимическим показателям, так и по трофическому статусу (табл.). Кроме того, озера расположены на довольно значительном расстоянии друг от друга, что определяет различные гидрометеорологические условия, несмотря на то что они находятся в пределах Северо-Западного региона России. В районе Псковско-Чудского озера эти условия в вегетационный период открытой воды в 2013 г. характеризовались очень скоротечной и теплой весной с полным отсутствием возвратных похолоданий; ранним наступлением сезона биологического лета, большой его продолжительностью, при отсутствии аномально высокого прогрева воды до среднесуточных температур

Некоторые лимнологические характеристики исследованных озер (пределы колебаний за вегетационный сезон в многолетнем ряду)

Some limnological characteristics of the investigated lakes (fluctuation limits of the vegetation season in long-term investigations)

Озеро Lake	Показатели Indicator	Глубина, м (средн.) Depth, m (average)	$\Sigma$ ионов, мг/л $\Sigma$ ions, mg/l	pH	Цветность, град. Chromaticity, grad.	$P_{\text{общ}}^{\text{г}}$ , мкг/л $P_{\text{ген}}^{\text{г}}$ , μg/l	$N_{\text{общ}}^{\text{г}}$ , мкг/л $N_{\text{ген}}^{\text{г}}$ , μg/l	Степень зарастания, % Scope of overgrowth, %
Псковско-Чудское* Lake Pskovsko-Chudskoe*		3,8	207–258	8,4–9,2	35–90	40–160	0,5–1,84	7–12
Красное** Lake Krasnoe**		4,5	50–55	6,9–8,3	26–56	34–63	0,5–0,69	5–7

Примечание. \* Данные по: [Псковско-Чудское..., 2012]; \*\* по: [Многолетние..., 2008].

Note. \* The data are given after [Lake Pskovsko-Chudskoe, 2012]; \*\* data are given after [Long-term..., 2008].

более 25 °С, и относительно продолжительным и теплым осенним периодом. Паводковый подъем уровня воды активно начинался после вскрытия озера и продолжался до июля, после чего плавно снижался до конца осени (рис. 2) [Оценить..., 2014]. В 2013 г. оз. Красное вскрылось на 10 дней позже, чем Псковско-Чудское. Весенний и летний периоды были более продолжительными и менее теплыми, среднесуточная  $t_{\text{воды}}$  летом не превышала 21,5 °С. Наиболее высокий уровень воды отмечался в мае, после чего он достаточно быстро снижался, минимальные величины наблюдались в июле (рис. 2) [Развитие..., 2018].

Весь анализируемый материал собирали с тростника южного (*Phragmites australis*). В оз. Красном этот вид на протяжении многих лет является основным ценозообразователем [Русанов, 2008]. В оз. Псковско-Чудском заросли тростника составляют 50 % общей площади зарастания [Псковско-Чудское..., 2012]. Про-

бы водорослей эпифитона отбирались с мая по октябрь с периодичностью 2–3 раза в месяц на станции в южной части Псковско-Чудского озера и 2 раза в месяц на станции в юго-восточной части оз. Красного (рис. 1). При сборе и первичной обработке проб использовали методику, применяемую в Институте озероведения РАН [Станиславская, Трифонова, 1984]. Обрастания с подводных частей растений (3–4 стебля) счищали с помощью зубной щетки в определенный объем (1 л) профильтрованной озерной воды. Выполнились две повторности. Часть пробы (100 мл) для определения численности и биомассы водорослей фиксировали 40% формалином до появления слабого запаха.

Пробы эпифитона и фитопланктона отбирались параллельно. Фитопланктон в Псковско-Чудском озере собирали на двух мониторинговых станциях (использовали средние данные по этим станциям); в оз. Красном – на одной глубоководной мониторинговой станции. Ма-

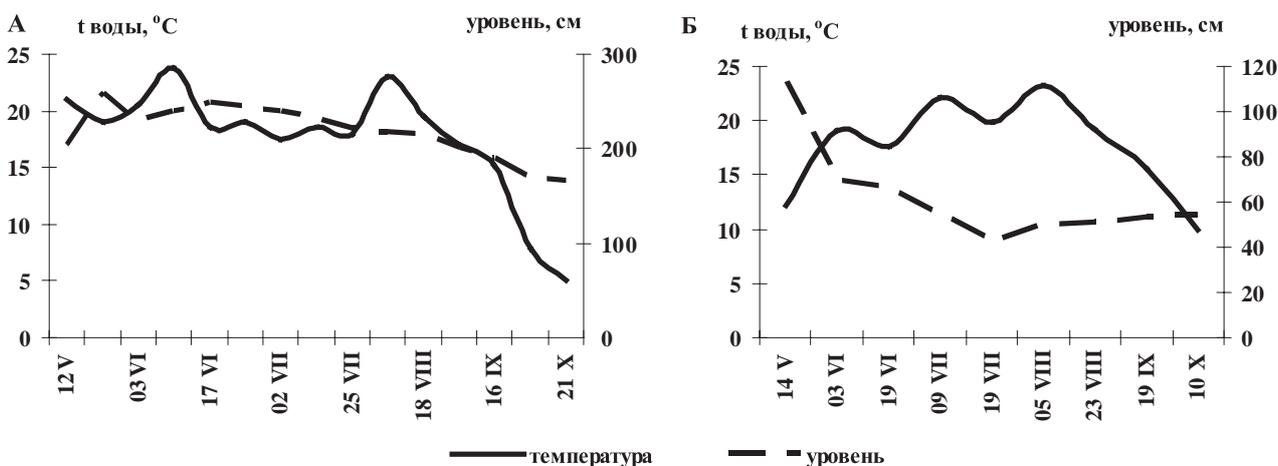


Рис. 2. Сезонный ход температуры ( $t$ , °С) и уровня воды в Псковско-Чудском озере (А) и в оз. Красном (Б) в 2013 г.

Fig. 2. The seasonal variation of temperature ( $t$ , °C) and water level in Lake Pskovsko-Chudskoe (A) and in Lake Krasnoe (B) in 2013

териалы отбирали с помощью батометра Рутнера и обрабатывали по стандартным методикам [Руководство..., 1983]. Пробы эпифитона и фитопланктона просчитывали в камере Нэжотта объемом 0,02 и 0,05 см<sup>3</sup> на микроскопе AxioLab A1 и AxioVert CFL 40 (Carl Zeiss) в 2–3 повторностях. Биомассу вычисляли счетно-объемным методом, приравнивая форму клеток к известным геометрическим фигурам [Hillebrand et al., 1999]. Биомассу эпифитона рассчитывали на м<sup>2</sup> субстрата, при анализе использовали средние величины этого показателя. Доминирующими считали виды, определяющие не менее 10 % общей биомассы. Для идентификации водорослей использовали отечественные и зарубежные определители и другие номенклатурные разработки.

Данные по среднесуточным температурам и уровням воды были получены на метеорологических постах, имеющих на обоих озерах.

### Результаты и обсуждение

Для сезонной динамики общей биомассы эпифитона в Псковско-Чудском озере было характерно наличие трех подъемов. Максимальный пик приходился на конец мая – начало июня, а также после постепенного спада уровня биомассы незначительные подъемы наблюдались в начале августа и середине сентября (рис. 3). К моменту начала отбора проб отмечен устойчивый переход среднесуточной температуры воды через 10 °С, что соответствовало «поздней весне» в годовом лимнологическом цикле Псковско-Чудского озера

[Оценить..., 2014]. В середине мая биомассу эпифитона определяли диатомовые водоросли, вклад которых составлял 99 % от общей биомассы. В этот период доминировала *Ulnaria ulna* (Nitzsch) P. Compère вместе с вариациями (40–60 % от общей биомассы). Субдоминантами выступали *Diatoma tenuis* C. Agardh, *Fragilaria capucina* Desmazieres, *Cymbella cistula* (Ehrenberg) Kirchner, *Navicula tripunctata* (O. Müller) Bory (= *Navicula gracilis* Ehrenberg). Биомасса эпифитона постепенно нарастала до  $6,5 \pm 0,6$  –  $8,4 \pm 0,9$  г/м<sup>2</sup> субстр.

В последней декаде мая интенсивный прогрев водных масс и наступление биологического лета (переход среднесуточной температуры воды через 15 °С) вызвали резкий подъем биомассы эпифитона (до  $18,0 \pm 1,2$  г/м<sup>2</sup> субстр.) в основном также за счет диатомовых водорослей, кроме того, в его составе отмечались зеленые водоросли, хотя их развитие было незначительным. Доминировали диатомовые *F. capucina*, *Cymbella lanceolata* (Agardh) Agardh и *U. ulna*, доля последней в общей биомассе постепенно уменьшалась, но увеличивалась роль *Melosira varians* Agardh. В начале июня уровень биомассы оставался прежним ( $16,7 \pm 0,9$  –  $17,8 \pm 1,0$  г/м<sup>2</sup> субстр.), но происходила перестройка структуры эпифитона за счет уменьшения доли диатомовых (70–77 %) и увеличения доли зеленых водорослей (20–27 %) в общей биомассе. Помимо *U. ulna* и *F. capucina* доминировали *M. varians* из диатомей и *Gonatozygon kinahanii* (W. Archer) Rabenhorst из зеленых. Крупные размеры *G. kinahanii* и субдоминанта *Oedogonium* sp.

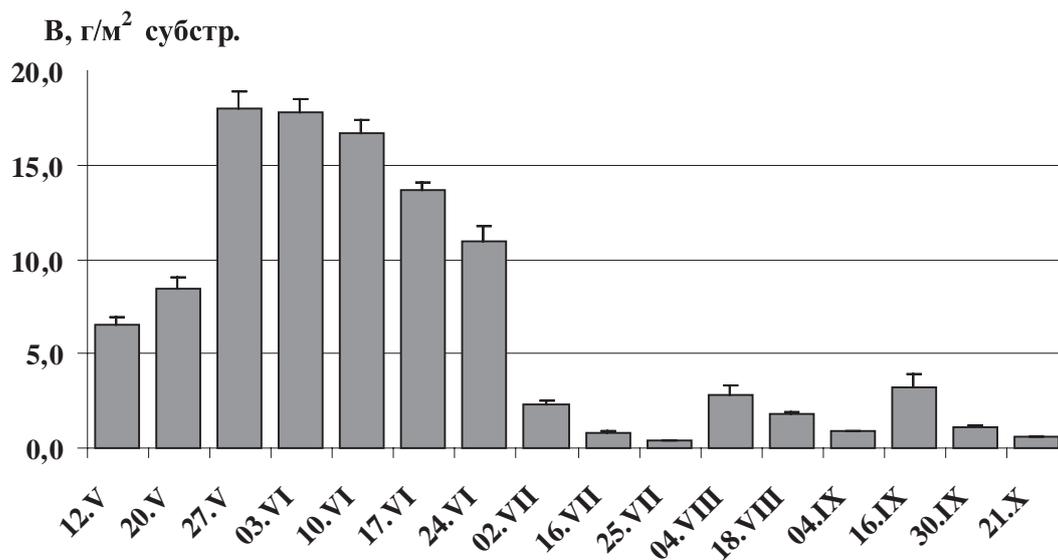


Рис. 3. Сезонная динамика общей биомассы эпифитона (B) в Псковско-Чудском озере в 2013 г.

Fig. 3. Seasonal dynamics of total biomass of epiphyton (B) in Lake Pskovsko-Chudskoe in 2013

определили существенный вклад зеленых водорослей в общую биомассу в этот период развития эпифитона. К середине июля было отмечено значительное снижение биомассы до  $0,8 \pm 0,1$  г/м<sup>2</sup> субстр. Основной фон обрастаний вновь определяли диатомовые водоросли. Доминантами летнего эпифитона были *N. tripunctata* и *T. flocculosa*. С начала августа по начало сентября зеленые водоросли занимали ведущее положение в структуре биомассы эпифитона (50–82%). Незначительный подъем биомассы в августе – до  $2,8 \pm 0,7$  г/м<sup>2</sup> субстр. – определяли *Oedogonium* sp. и *Stigeoclonium tenue* (Agardh) Kützing, последний оставался в числе доминантов вплоть до конца октября. Среди доминирующих видов начала сентября отмечены *Cocconeis placentula* Ehrenberg из диатомовых и пресноводная красная водоросль *Chantransia chalybea* (Roth) Fries (= *Audouinella chalybaea* (Roth) Bory). В середине сентября наблюдался третий подъем биомассы эпифитона ( $3,2 \pm 1,0$  г/м<sup>2</sup> субстр.), обусловленный развитием *S. tenue* и видов рода *Encyonema*. С установлением биологической осени уровень биомассы постепенно снижался, не превышая  $0,6 \pm 0,2$  г/м<sup>2</sup> субстр. в конце октября. Среди доминирующих видов оставались *S. tenue*, *C. placentula* и *N. tripunctata*.

Для сезонной динамики общей биомассы эпифитона в оз. Красном было характерно наличие одного максимального летнего пика, который приходился на конец июля, и двух незначительных подъемов биомассы в середине июня и октября (рис. 4). В составе эпифитона преобладали диатомовые и зеленые водоросли, по сравнению с другими годами в 2013 г.

роль зеленых водорослей была значительно ниже [Станиславская, 2008]. В конце мая биомасса эпифитона была минимальной за весь период исследований –  $5,0 \pm 0,1$  г/м<sup>2</sup> субстр., она определялась развитием двух видов диатомовых водорослей – *U. ulna* и *T. fenestrata* (Lyngbye) Kützing, которые составляли 75 и 20 % общей биомассы соответственно. В начале июня биомасса эпифитона возрастала до  $6,6 \pm 0,2$  г/м<sup>2</sup> субстр. В составе доминантов эпифитона продолжали развиваться *U. ulna* (26 %) и *T. fenestrata* (25 %), появлялись также *Gomphonema acuminatum* Ehrenberg (19 %) и *C. cistula* (10 %). В конце июня доминирующий комплекс эпифитона оставался прежним, изменялся лишь вклад видов в общую биомассу. Так, *T. fenestrata* и *G. acuminatum* определяли до 17 % общей биомассы, а *U. ulna* и *C. cistula* – до 12 %. В начале июля биомасса увеличивалась до  $7,4 \pm 0,3$  г/м<sup>2</sup> субстр., в составе эпифитона появлялись зеленые водоросли, которые определяли 43 % общей биомассы и были представлены видами рода *Oedogonium*. Наряду с ними продолжали развиваться диатомеи, среди которых были *M. varians* (10 %), *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kützing (10 %) и виды рода *Cymbella*, вклад которых вместе составлял около 18 %. В конце июля наблюдалась максимальная биомасса эпифитона –  $12,6 \pm 0,9$  г/м<sup>2</sup> субстр., а доминирующие виды и соотношение основных групп водорослей оставались прежними. В начале августа роль зеленых водорослей значительно снижалась. Среди диатомовых водорослей продолжали доминировать виды рода *Cymbella* (35 %) и *G. acuminatum* (22 %), вновь в составе доминирующих видов

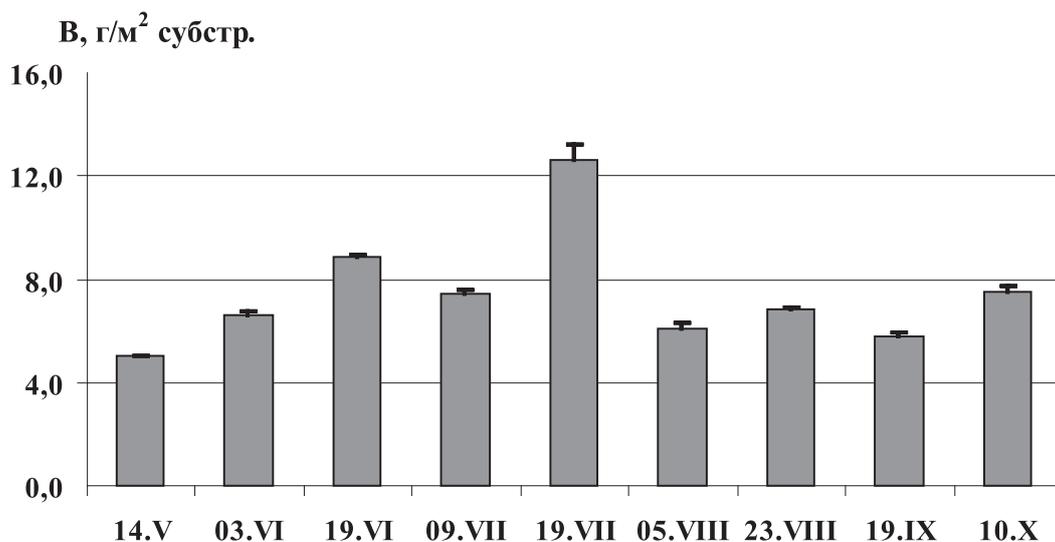


Рис. 4. Сезонная динамика биомассы (B) эпифитона в оз. Красном в 2013 г.

Fig. 4. Seasonal dynamics of biomass (B) of epiphyton in Lake Krasnoe in 2013

отмечалась *U. ulna* (13%). Биомасса водорослей эпифитона в этот период составляла  $6,1 \pm 0,3$  г/м<sup>2</sup> субстр.

В сентябре биомасса эпифитона была практически на том же уровне, увеличился вклад *U. ulna*, который составлял 40% от общей биомассы. В числе доминирующих видов также отмечены виды родов *Cocconeis* и *Cymbella*, которые определяли 31% общей биомассы. В октябре продолжали развиваться диатомовые водоросли и биомасса эпифитона повышалась до  $7,5 \pm 0,31$  г/м<sup>2</sup> субстр. Вклад видов рода *Cocconeis* увеличивался до 55%, а виды рода *Cymbella* определяли до 23% общей биомассы. Кроме того, заметным было развитие *M. varians* и видов рода *Ulnaria*.

Таким образом, биомасса эпифитона в Псковско-Чудском озере на протяжении вегетационного периода изменялась от 0,8 до  $17,8$  г/м<sup>2</sup> субстр., в среднем составляя  $6,6 \pm 5,74$  г/м<sup>2</sup> субстр. Максимальное развитие эпифитона зафиксировано в начале вегетационного периода, а минимальные значения – в конце июля.

В оз. Красном биомасса эпифитона изменялась в менее широких пределах: от 5 до  $12,2$  г/м<sup>2</sup> субстр., в среднем составляя  $7,6 \pm 1,5$  г/м<sup>2</sup> субстрата. Максимальное развитие эпифитона отмечалось в конце июля, а минимальные значения приходились на конец мая. Следует отметить, что величины биомассы эпифитона в обоих озерах соответствовали уровню количественного развития водорослей обрастаний в большинстве мезотрофных и эвтрофных озер Северо-Западного региона и других районов умеренной зоны [Meulemans, 1988; Касперовичене, Каросене, 2005; Станиславская, 2011].

В период исследований в эпифитоне Псковско-Чудского озера постоянно встречались, но не входили в состав доминирующего комплекса *Achnanthes minutissima* Kützing, *Navicula cryptocephala* Kützing, *N. radiosa* Kützing, *Gomphonema parvulum* (Kützing) Kützing, *Rhoicosphaenia abbreviata* (Agardh) Lange-Bertalot из диатомовых водорослей; *Scenedesmus quadricauda* (Turpin) Brébisson, *Pediastrum boryanum* (Turpin) Meneghini, *P. tetras* (Ehrenberg) Ralfs из зеленых и *Heteroleibleinia kuetzingii* (Schmidle) Compère из цианопрокариот. Следует отметить, что в оз. Красном большинство перечисленных видов также определяли основной фон обрастаний на протяжении всего вегетационного периода 2013 г.

Сезонная динамика биомассы водорослей обрастаний в зарослях тростника в водоемах различного типа трофии изучена достаточно хо-

рошо [Басова, 1976; Laugaste, Reunanen, 2005; Станиславская, 2008; Karosienė, Kasperovičienė, 2008]. Установлено, что в озерах можно наблюдать разнообразные типы сезонных сукцессий эпифитона. Так, на тростнике (*Phragmites australis*) в олигомезотрофном озере Маарсеевен (Нидерланды) и эвтрофном озере Белау (Германия) наблюдался один весенний максимум биомассы эпифитона [Meulemans, 1988; Müller, 1994]. Чаше в сезонной динамике этого сообщества можно наблюдать наличие весеннего или раннелетнего подъема биомассы, затем снижение ее летом и увеличение к осени [Cattaneo, Kalff, 1978; Kairesalo, 1984; Метелева, 2013]. В некоторых водоемах может отмечаться один летний пик биомассы и затем спад к концу сезона [Eloranta, 1982; Laugaste, Reunanen, 2005; Tarkowska-Kukuryk, Mieczan, 2012]. В эвтрофных озерах часто наблюдается постепенное нарастание биомассы эпифитона с максимумом в конце вегетационного сезона [Станиславская, 1988, 2011; Albay, Аксаалан, 2003].

Многолетние исследования эпифитона оз. Красного показали, что сезонный ход его динамики может значительно меняться по годам [Станиславская, 2008]. В 70-х годах прошлого века в сезонной сукцессии эпифитона наблюдалось три подъема биомассы. Максимальный пик развития водорослей приходился на весеннее время, затем следовали хорошо выраженные летний и позднеосенний подъемы [Басова, 1976]. В дальнейшем было установлено, что в сезонном развитии обрастаний отмечались как весенние, так и осенние максимальные подъемы биомассы, которые в большей степени связаны с изменяющимися погодными и гидрологическими условиями разных лет [Станиславская, 2008]. Особенностью развития эпифитона в 2013 г. было отсутствие максимального весеннего пика и наличие летнего подъема биомассы, вызванного вегетацией диатомовых и зеленых водорослей. Отсутствие весеннего пика биомассы обрастаний в оз. Красном, возможно, связано с более поздними сроками вскрытия озера ото льда, замедленными темпами прогрева воды и сравнительно высоким уровнем воды в этот период.

В Псковско-Чудском озере в 2013 г. наблюдался один весенний максимальный пик биомассы, вызванный развитием в основном диатомовых водорослей, и два небольших подъема в летнее и осеннее время, которые определяли зеленые и диатомовые водоросли.

Высокий подъем биомассы водорослей весной может быть связан в первую очередь с относительно слабым развитием макрофитов,

еще не затеняющих обрастания, которые при более доступном свете развиваются особенно интенсивно [Eloranta, 1982; Meulemans, 1988; Wetzel, 2001]. Кроме того, весной отмечаются наиболее высокие концентрации биогенных элементов, что также способствует быстрому росту обрастаний [Wetzel, 2001]. Весенний пик развития обрастаний в мезотрофных и эвтрофных водоемах Северо-Запада России и других регионов связан обычно с видами диатомовых водорослей, которые имеют достаточно широкий температурный оптимум и могут развиваться на протяжении всего вегетационного сезона [Водоросли..., 1989]. Летняя депрессия эпифитона наступает, как правило, в момент максимального развития макрофитов, что приводит к значительному затенению прикрепленных сообществ и, соответственно, к снижению биомассы водорослей [Eloranta, 1982; Wetzel, 2001]. В летний период в связи с прогревом воды наряду с диатомеями появляются, как правило, зеленые нитчатые водоросли. Этот факт отмечается большинством авторов при изучении обрастаний [Roos et al., 1981; Судница, 2008; Станиславская, 2011; Метелева, 2013]. Среди этих водорослей наиболее распространены виды родов *Oedogonium*, *Spirogyra*, *Mougeotia*. Вместе с тем наличие летней депрессии эпифитона чаще всего связывают с интенсивным развитием фитопланктона в этот период [Hansson, 1988, 1992; Wetzel, 2001; Касперовичене, Каросене, 2005]. Массо-

вое развитие планктонных водорослей снижает возможность проникновения света в толщу воды и таким образом приводит к замедлению темпов развития прикрепленных сообществ. Осенью также может наблюдаться подъем биомассы эпифитона, как реакция на увеличение концентрации биогенов. Это происходит за счет их смыва с водосборной территории с осенними паводками, в процессе отмирания и разложения высшей водной растительности и в результате вымывания биогенов из донных отложений. Осенью в эпифитоне, как правило, вновь доминируют диатомовые водоросли, в некоторых случаях это те же виды, которые преобладали в начале вегетационного сезона.

Сезонная динамика биомассы фитопланктона в Псковско-Чудском озере характеризовалась относительно низкими величинами весной, а начиная с конца июня наблюдалось ее значительное увеличение до конца октября [Оценить..., 2014]. В период максимального развития фитопланктона происходило снижение биомассы эпифитона, которое продолжалось практически на всем протяжении лета и осени. В оз. Красном сезонная динамика биомассы фитопланктона характеризовалась двумя пиками – в июне и в конце лета [Развитие..., 2018]. Значительное снижение биомассы фитопланктона наблюдалось на протяжении всего июля, именно в этот период отмечался максимальный пик развития эпифитона (рис. 5).

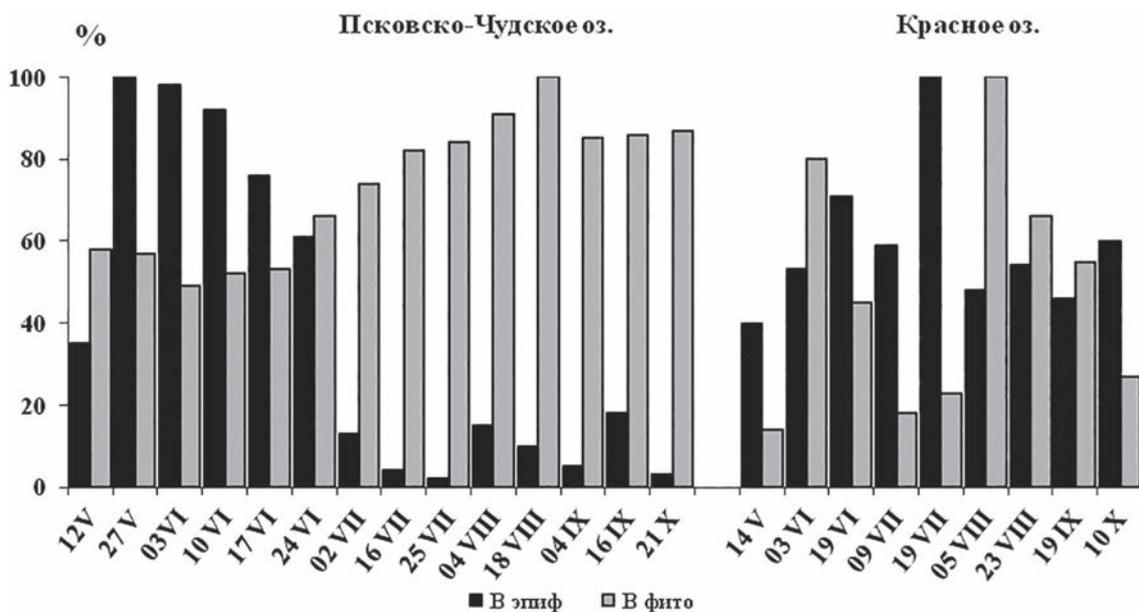


Рис. 5. Процентное соотношение биомассы (% от максимальной биомассы) эпифитона ( $B_{\text{эпиф}}$ ) и фитопланктона ( $B_{\text{фито}}$ ) в исследованных озерах в 2013 г.

Fig. 5. Percentage ratio biomass (% of max total biomass) of epiphyton ( $B_{\text{ep}}$ ) and phytoplankton ( $B_{\text{phyto}}$ ) in the studied lakes in 2013

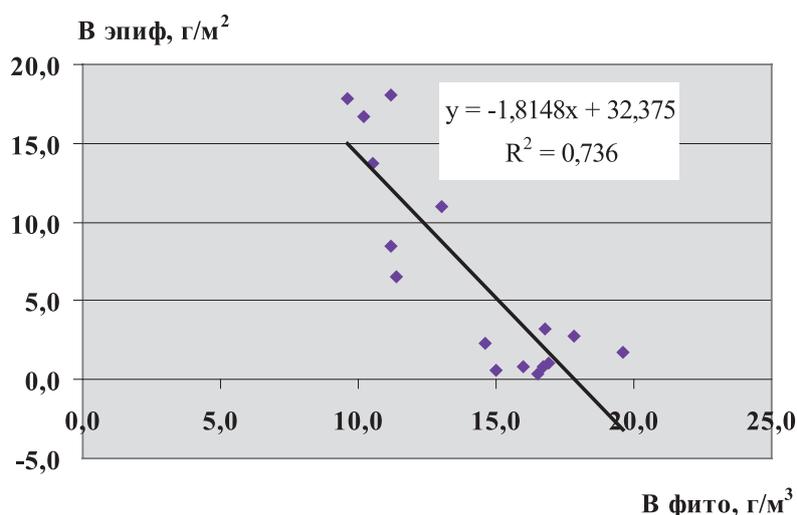


Рис. 6. Зависимость биомассы эпифитона ( $B_{\text{эпиф}}$ ) от биомассы фитопланктона ( $B_{\text{фито}}$ ) в Псковско-Чудском озере в 2013 г.

Fig. 6. Dependence of the epiphyton biomass ( $B_{\text{ep}}$ ) on the phytoplankton biomass ( $B_{\text{phyto}}$ ) in Lake Pskovsko-Chudskoe in 2013

Проведенный корреляционный анализ динамики биомассы фитопланктона и биомассы эпифитона показал, что достоверная связь этих показателей с высоким коэффициентом корреляции (0,736) существует только для Псковско-Чудского озера (рис. 6), тогда как в оз. Красном эта связь не прослеживается.

Температура и уровень воды также могут влиять на структуру прикрепленных сообществ. Отмечается, что высокий уровень воды и ее интенсивный прогрев в весеннее время может способствовать максимальному за вегетационный сезон развитию обрастаний. Напротив, длительное повышение уровня воды в течение летних месяцев может приводить к снижению количественных показателей эпифитона, изменению хода сезонной динамики, значительному снижению видового разнообразия и выпадению из состава доминирующих комплексов отдельных видов. Низкий уровень воды в летние месяцы может обуславливать массовое развитие в составе эпифитона зеленых нитчаток и значительное увеличение его количественных показателей [Девяткин, 2003; Комулайнен, 2004; Станиславская, 2008; Трифонова и др., 2017].

В 2013 г. в Псковско-Чудском озере наблюдался повышенный, но относительно стабильный уровень воды с максимальными значениями в весеннее время. Максимальный пик развития эпифитона в этом озере совпадал с наиболее высоким уровнем воды. В дальнейшем уровень воды, а также температура не оказывали существенного влияния на развитие обрастаний. В оз. Красном при максимальном весеннем подъеме уровня воды пика биомассы

отмечено не было. Относительно низкий уровень воды и снижение температуры в середине июля совпадали с максимальным подъемом биомассы эпифитона. Однако проведенный корреляционный анализ выявил отсутствие достоверной связи этих показателей с динамикой биомассы эпифитона в обоих озерах.

### Заключение

Сезонная динамика эпифитона в двух разнотипных озерах Северо-Запада в исследуемый период различалась. В Псковско-Чудском озере его максимальное развитие наблюдалось весной, а в оз. Красном – летом. Структуру эпифитона в исследованных озерах определяли диатомовые и зеленые водоросли. Уровень количественного развития обрастаний в обоих озерах находился в пределах величин, характерных для эвтрофных водоемов Северо-Западного региона России. В оз. Красном средняя биомасса эпифитона за вегетационный сезон была выше, чем в Псковско-Чудском озере. Списки диатомовых водорослей в доминирующих комплексах эпифитона двух озер в течение вегетационного периода, и особенно весной, были практически идентичны. Весной и в начале лета в Псковско-Чудском озере появлялись зеленые водоросли, тогда как в оз. Красном они были отмечены только в середине лета. Состав зеленых водорослей, доминирующих в эпифитоне исследованных озер, различался. Осенью в обоих озерах одновременно доминировали диатомовые и зеленые водоросли. Достоверно установлено, что

наиболее существенным фактором, влияющим на сезонную динамику обрастаний в Псковско-Чудском озере, было развитие фитопланктона, причем развитие это было «противофазным», для оз. Красного эта зависимость статистически недостоверна. Достоверной связи биомассы эпифитона с такими абиотическими факторами, как температура и уровень воды, в обоих озерах также не выявлено.

*Работа выполнена при частичном бюджетном финансировании в рамках государственного задания ИНОЗ РАН по темам №№ 0154-2018-0004 и 0154-2019-0001.*

*Статья подготовлена по материалам, представленным на V Международной конференции молодых ученых «Водные ресурсы: изучение и управление» (Лимнологическая школа-практика) – Water Resources: Research and Management.*

*Авторы благодарят Ученого секретаря ИНОЗ РАН О. А. Павлову за ценные советы при написании статьи и помощь в статистической обработке материала, а также И. С. Трифонову, А. Л. Афанасьеву, В. В. Ястремского, А. Н. Егорова за предоставление данных, использованных в работе.*

## Литература

- Басова С. Л.* Состав, распределение и продуктивность перифитона и микрофитобентоса // Биологическая продуктивность озера Красного. Л.: Наука, 1976. С. 104–120.
- Водоросли: справочник* / Ред. С. П. Вассер, Н. В. Кондратьева, Н. П. Масюк. Киев: Наукова думка, 1989. 608 с.
- Девяткин В. Г.* Структура и продуктивность литоральных альгоценозов водохранилищ Верхней Волги: автореф. дис. ... докт. биол. наук. М.: МГУ, 2003. 50 с.
- Касперовичене Ю., Каросене Ю.* Структурно-функциональная характеристика эпифитона и фитопланктона литоральной зоны оз. Спера // Вестник Тюмен. гос. ун-та. 2005. № 5. С. 70–76.
- Колченко М. В.* Диатомовые водоросли летнего эпифитона Псковско-Чудского озера // Диатомовые водоросли: современное состояние и перспективы исследований: Материалы XIII Междунар. науч. конф. (Борок, 24–29 августа 2013 г.). Борок, 2013. С. 125–126.
- Колченко М. В.* Особенности структуры эпифитона Псковско-Чудского озера в районах с различной степенью антропогенного загрязнения // Труды ЗИН РАН. 2016. Т. 320, № 3. С. 316–325.
- Комулайнен С. Ф.* Экология фитоперифитона малых рек Восточной Фенноскандии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. 181 с.
- Метелева Н. Ю.* Структура и продуктивность фитоперифитона водоемов бассейна Волги: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Борок, 2013. 22 с.
- Многолетние изменения биологических сообществ мезотрофного озера в условиях климатических флуктуаций и эвтрофирования* / Ред. И. С. Трифонова. СПб.: Лема, 2008. 245 с.
- Оценить состояние запасов водных биологических ресурсов, разработать рекомендации по их рациональному использованию, прогнозы ОДУ и возможного вылова на 2015 г. в пресноводных водных объектах зоны ответственности ФГБНУ «ГосНИОРХ»* // Биологическое обоснование к прогнозу вылова на 2015 г. в Чудско-Псковском озере: заключительный отчет о выполнении НИОКР по теме № 45 / Псковское отд. ФГБНУ «ГосНИОРХ»; рук. С. О. Северин. Псков, 2014. 133 с.
- Псковско-Чудское озеро* / Ред. Т. Тимм, А. Раукас, Ю. Хаберман, А. Яани. Тарту: Eesti Loodustfoto, 2012. 490 с.
- Распопов И. М., Воронцов Ф. Ф., Слепухина Т. Д., Доценко О. Н., Рычкова М. А.* Роль волнения в формировании биоценозов бентоса больших озер. Л.: Наука, 1990. 114 с.
- Развитие теории и практики исследований, оценки экологических и социально-экономических последствий эвтрофирования и антропогенных трансформаций разномасштабных пресноводных водоемов: Отчет о НИР по теме № 0154-2018-0004 (заключ.)* / ИНОЗ РАН; рук. В. А. Румянцев, И. С. Трифонова. СПб., 2018. 302 с. № ГР 01201363380.
- Рычкова М. А.* Водоросли обрастаний озера Ильмень // Гидробиол. журн. 1986. Т. 22, № 5. С. 24–26.
- Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений* / Под ред. В. А. Абакумова. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 239 с.
- Русанов А. Г.* Многолетние изменения состава и структуры сообществ макрофитов // Многолетние изменения биологических сообществ мезотрофного озера в условиях климатических флуктуаций и эвтрофирования. СПб.: Лема, 2008. С. 83–106.
- Станиславская Е. В.* Количественные показатели растительного перифитона в разнотипных озерах // Изменение структуры экосистем озер в условиях возрастающей биогенной нагрузки. Л.: Наука, 1988. С. 187–194.
- Станиславская Е. В.* Многолетние изменения состава и структуры растительного перифитона // Многолетние изменения биологических сообществ мезотрофного озера в условиях климатических флуктуаций и эвтрофирования. СПб.: Лема, 2008. С. 65–82.
- Станиславская Е. В.* Сезонная динамика структуры и уровня биомассы фитоперифитона в разнотипных озерах // Водоросли: таксономия, экология, использование в мониторинге. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. С. 222–226.
- Станиславская Е. В., Трифонова И. С.* Продукционная характеристика растительного перифитона // Особенности формирования качества воды в разнотипных озерах Карельского перешейка. Л.: Наука, 1984. С. 192–206.
- Судницына Д. Н.* Состав и структура летнего фитоперифитона на макрофитах Псковско-Чудского озера // Перифитон и обрастание: теория и практи-

ка: Тезисы докл. Междунар. науч.-практ. конф. (СПб, 22–25 окт. 2008 г.). СПб., 2008. С. 138–140.

Трифонов И. С., Афанасьева А. Л., Беляков В. П., Бардинский Д. С., Родионова Н. В., Русанов А. Г., Станиславская Е. В. Влияние колебаний гидрологического режима на состояние биологических сообществ эвтрофирующегося озера // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. Т. 19, № 2(3). С. 561–569.

Ястремский В. В. Многолетние изменения структуры и продуктивности фитопланктона в пелагиали Чудско-Псковского озера // Исследования экосистем крупных рыбопромысловых водоемов Северо-Запада России: Сб. науч. трудов ГосНИОРХ. СПб.: Нестор-История, 2011. Вып. 341. С. 57–83.

Albay M., Akcaalan R. Comparative study of periphyton colonization on common reed (*Phragmites australis*) and artificial substrate in a shallow lake Manyas, Turkey // Hydrobiologia. 2003. Vol. 506–509. P. 531–540.

Cattaneo A., Kalff J. Seasonal changes in the epiphyte community of natural and artificial macrophytes in Lake Memphremagog // Hydrobiologia. 1978. Vol. 60. P. 135–144.

Cattaneo A., Kalff J. Primary production of algae growing on natural and artificial plants: a study of interactions between epiphytes and their substrate // Limnol. Oceanogr. 1979. Vol. 24. P. 1031–1037.

Eloranta P. V. Periphyton growth and diatom community structure in a cooling water pond // Hydrobiologia. 1982. Vol. 96. P. 253–265.

Hansson L. A. Effect of competitive interactions on biomass development of planctonic and periphytic algae in lakes // Limnol. Oceanogr. 1988. Vol. 3, no. 1. P. 121–128.

Hansson L. A. Factors regulating periphytic algal biomass // Limnol. Oceanogr. 1992. Vol. 37(2). P. 322–328.

Hillebrand H., Dürselen C.-D., Kirschtel D., Pollinger U., Zohary T. Biovolume calculation for pella-

gic and benthic microalgae // J. Phycol. 1999. Vol. 35. P. 403–424.

Kairesalo T. Seasonal succession of epiphytic communities within an *Equisetum fluviatile* L. stand in lake Pääjärvi, Southern Finland // Int. Revue ges. Hydrobiol. 1984. Vol. 69, no. 4. P. 475–505.

Karosienė J., Kasperovičienė J. Seasonal succession of epiphyton algal communities on *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud in a mesoeutrophic lake // Ekologija. 2008. Vol. 54, no. 1. P. 32–39.

Laugaste R., Reunanen M. The composition and density of epiphyton on some macrophyte species in the partly meromictic Lake Verevi // Hydrobiologia. 2005. Vol. 547. P. 137–150.

Meulemans J. T. Seasonal changes in biomass and production on periphyton growing upon reed in Lake Maarsseveen I. // Archiv für Hydrobiol. 1988. Vol. 112. P. 21–42.

Müller U. Seasonal development of epiphytic algae on *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud in eutrophic lake // Archiv für Hydrobiol. 1994. Vol. 129(3). P. 273–292.

Oleksowicz A. S. Interactions among algal communities in three lakes of the Tuchola Forest area (Northern Poland) // Arch. Hydrobiol. Suppl. 1982. Vol. 63. P. 77–90.

Roos P. J., Post A. F., Revier J. M. Dynamics and architecture of reed periphyton // Verh. Internat. Verein. Limnol. 1981. Vol. 21. P. 948–953.

Tarkowska-Kukuryk M., Mieczan T. Effect of substrate on periphyton communities and relationships among food web components in shallow hypertrophic lake // J. Limnol. 2012. Vol. 71(2). P. 279–290. doi: 10.4081/j.limnol.2012.e30

Wetzel R. G. Land-water interfaces: attached microorganisms, littoral algae and zooplankton // Limnology, Lake and River Ecosystems. 2001. P. 577–135.

Поступила в редакцию 15.03.2019

## References

Basova S. L. Sostav, raspredelenie i produktivnost' perifitona i mikrofitobentosa [Periphyton and microphytobentos composition, distribution, and productivity]. *Biol. produktivnost' ozera Krasnogo* [Biol. productivity of Lake Krasnoe]. Leningrad: Nauka, 1976. P. 104–120.

Devyatkin V. G. Struktura i produktivnost' litoral'nykh al'gotsenozov vodokhranilishch Verkhnei Volgi [Structure and productivity of littoral algalocenoses in the Upper Volga reservoirs]: Summary of DSc (Dr. of Biol.) thesis. Moscow, 2003. 50 p.

Kasperovichene Yu., Karosene Yu. Strukturno-funktional'naya kharakteristika epifitona i fitoplanktona litoral'noi zony oz. Spera [Structural and functional characteristics of epiphyton and phytoplankton in the Lake Spera littoral]. *Vestnik Tyumen'skogo gos. un-ta* [Bull. Tyumen St. Univ.]. 2005. No. 5. P. 70–76.

Kolchenko M. V. Diatomovye vodorosli letnego epifitona Pskovsko-Chudskogo ozera [Diatom algae of the summer epiphyton of Lake Peipus]. *Diatomovye vodorosli: sovr. sostoyanie i perspektivy issled.*: Mat. XIII Mezhdunar. nauch. konf. (Borok, 24–29 avg. 2013 g.)

[Diatom algae: Current state and research prospects: Proceed. XIII int. sci. conf. (Borok, Aug. 24–29, 2013). Borok, 2013. P. 125–126.

Kolchenko M. V. Osobennosti struktury epifitona Pskovsko-Chudskogo ozera v raionakh s razlichnoi stepen'yu antropogennogo zagryazneniya [Epiphyton structure peculiarities in the regions of Lake Peipus with various degree of man-induced pollution]. *Trudy ZIN RAN* [Proceed. Zool. Inst., RAS]. 2016. Vol. 320, no. 3. P. 316–325.

Komulainen S. F. Ekologiya fitoperifitona malykh rek Vostochnoi Fennoskandii [Ecology of phytoperiphyton in small rivers of East Fennoscandia]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2004. 182 p.

Metel'eva N. Yu. Struktura i produktivnost' fitoperifitona vodoemov basseina Volgi [Structure and productivity of phytoperiphyton in the Volga basin reservoirs]: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Borok, 2013. 22 p.

Mnogoletnie izmeneniya biologicheskikh soobshchestv mezotrofnogo ozera v usloviyakh klimatiche-

skikh fluktuatsii i evtrofirovaniya [Long-term changes of biological communities in a mesotrophic lake in the conditions of climatic fluctuations and eutrophication]. Ed. I. S. Trifonova. St. Petersburg: Lema, 2008. 245 p.

Otsenit' sostoyanie zapasov vodnykh biologicheskikh resursov, razrabotat' rekomendatsii po ikh ratsional'nomu ispol'zovaniyu, prognozy ODU i vozmozhnogo vylova na 2015 g. v presnovodnykh vodnykh ob'ektakh zony otvetstvennosti FGBNU "GosNIORKh" [Aquatic biological resources evaluation; development of recommendations on resources rational usage; prognosis of fishing limits in 2015 in freshwater water bodies in the Berg State Research Institute on Lake and River Fisheries responsibility zone]. Biological rationale of fisheries in Lake Peipus in 2015: final report. Pskov, 2014. 133 p.

Pskovsko-Chudskoe ozero [Lake Pskovsko-Chudskoe]. Tartu: Eesti Loodustfoto, 2012. 490 p.

Raspopov I. M., Vorontsov F. F., Slepukhina T. D., Dotsenko O. N., Rychkova M. A. Rol' volneniya v formirovani biotsenozov bentosa bol'shikh ozer [The role of disturbance in the formation of large lakes benthic biocenoses]. Leningrad: Nauka, 1990. 114 p.

Razvitie teorii i praktiki issledovaniy, otsenki ekologicheskikh i sotsial'no-ekonomicheskikh posledstviy evtrofirovaniya i antropogennykh transformatsii raznomasshtabnykh presnovodnykh vodoemov [Development of the theory and practice of research, assessment of the environmental and socio-economic consequences of eutrophication and anthropogenic transformations of multi-scale freshwater reservoirs]. Research report on the topic number 0154-2018-0004 (final). [Inst. Limnology, RAS]. St. Petersburg, 2018. 302 p. No. GR 01201363380.

Rukovodstvo po metodam gidrobiologicheskogo analiza poverkhnostnykh vod i donnykh otlozheniy [Guide to methods of hydrobiological analysis of surface water and bottom sediments]. Ed. V. A. Abakumov. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983. 239 p.

Rusanov A. G. Mnogoletnie izmeneniya sostava i struktury soobshchestv makrofitov [Long-term changes of species composition and structure of macrophyte communities]. *Mnogoletnie izmeneniya biol. soobshchestv mezotrofnogo ozera v usloviyakh klimaticheskikh fluktuatsii i evtrofirovaniya* [Long-term changes of biol. communities in a mesotrophic lake in the conditions of climatic fluctuations and eutrophication]. St. Petersburg: Lema, 2008. P. 83–106.

Rychkova M. A. Vodorosli obrastanii ozera Il'men' [Attached algae in Lake Ilmen]. *Gidrobiol. zhurn.* [Hydrobiol. J.]. 1986. Vol. 22, no. 5. P. 24–26.

Stanislavskaya E. V. Kolichestvennye pokazateli rastitel'nogo perifitona v raznotipnykh ozerakh [Quantitative indicators of phytoplankton in lakes of different type]. *Izmenenie struktury ekosistem ozer v usloviyakh vozrastayushchei biogennoi nagruzki* [Lakes ecosystems structure changes under the conditions of increasing nutrient stress]. Leningrad: Nauka, 1988. P. 187–194.

Stanislavskaya E. V. Mnogoletnie izmeneniya sostava i struktury rastitel'nogo perifitona [Long-term changes of species composition and structure of periphyton]. *Mnogoletnie izmeneniya biol. soobshchestv mezotrofnogo ozera v usloviyakh klimaticheskikh fluktuatsii i*

*evtrofirovaniya* [Long-term changes of biol. communities in a mesotrophic lake in the conditions of climatic fluctuations and eutrophication]. St. Petersburg: Lema, 2008. P. 65–82.

Stanislavskaya E. V. Sezonnaya dinamika struktury i urovnya biomassy fitoperifitona v raznotipnykh ozerakh [Seasonal dynamics of phytoplankton structure and biomass level in lakes of different type]. *Vodorosli: taksonomiya, ecol., ispol'zovanie v monitoringe* [Algae: taxonomy, ecol., application in monitoring]. Ekaterinburg, Ural Branch of RAS, 2011. P. 222–226.

Stanislavskaya E. V., Trifonova I. S. Produktsionnaya kharakteristika rastitel'nogo perifitona [Production characteristics of phytoplankton]. *Osobennosti formirovaniya kachestva vody v raznotipnykh ozerakh Karel'skogo peresheika* [Specifics of water quality evolution in lakes of different types of Karelian Isthmus]. Leningrad: Nauka, 1984. P. 192–206.

Sudnitsyna D. N. Sostav i struktura letnego fitoperifitona na makrofitakh Pskovsko-Chudskogo ozera [Composition and structure of summer periphyton on macrophyte plants of Lake Peipsi/Pihkva]. *Perifiton i obrastanie: teoriya i praktika*: Sbornik tez. nauch.-pract. conf. [Periphyton and fouling: theory and practice: Proceed. sci.-pract. conf. (St. Petersburg, Oct. 22–25, 2008)]. St. Petersburg, 2008. P. 138–140.

Trifonova I. S., Afanas'eva A. L., Belyakov V. P., Bardinskii D. S., Rodionova N. V., Rusanov A. G., Stanislavskaya E. V. Vliyanie kolebanii gidrologicheskogo rezhima na sostoyanie biologicheskikh soobshchestv evtrofiruyushchegosya ozera [The influence of fluctuations of the hydrological regime on the state of biological communities of an eutrophying lake]. *Izv. Samarskogo nauch. tsentra RAN* [Proceed. Samara Sci. Center, RAS]. 2017. Vol. 19, no. 2(3). P. 561–569.

Vodorosli: spravochnik [Algae: a reference book]. Kiev: Naukova dumka, 1989. 608 p.

Yastremskii V. V. Mnogoletnie izmeneniya struktury i produktivnosti fitoplanktona v pelagialii Chudsko-Pskovskogo ozera [Long-term changes of phytoplankton structure and productivity in the pelagic zone of Lake Chudsko-Pskovskoe]. *Issled. ekosistem krupnykh rybopromyslovykh vodoemov Severo-Zapada Rossii*: sbornik nauch. trudov GosNIORKh [Research of large fishing water bodies ecosystems in the North-West Russia: Proceed. Berg St. e Research Inst. on Lake and River Fisheries]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2011. Iss. 341. P. 57–83.

Albay M., Akcaalan R. Comparative study of periphyton colonization on common reed (*Phragmites australis*) and artificial substrate in a shallow lake Manyas, Turkey. *Hydrobiologia*. 2003. Vol. 506–509. P. 531–540.

Cattaneo A., Kalff J. Seasonal changes in the epiphyte community of natural and artificial macrophytes in Lake Memphremagog. *Hydrobiologia*. 1978. Vol. 60. P. 135–144.

Cattaneo A., Kalff J. Primary production of algae growing on natural and artificial plants: a study of interactions between epiphytes and their substrate. *Limnol. Oceanogr.* 1979. Vol. 24. P. 1031–1037.

Eloranta P. V. Periphyton growth and diatom community structure in a cooling water pond. *Hydrobiologia*. 1982. Vol. 96. P. 253–265.

Hansson L. A. Effect of competitive interactions on biomass development of planktonic and periphytic algae in lakes. *Limnol. Oceanogr.* 1988. Vol. 3, no. 1. P. 121–128.

Hansson L. A. Factors regulating periphytic algal biomass. *Limnol. Oceanogr.* 1992. Vol. 37(2). P. 322–328.

Hillebrand H., Dürselen C.-D., Kirschtel D., Pollingher U., Zohary T. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *J. Phycol.* 1999. Vol. 35. P. 403–424.

Kairesalo T. Seasonal succession of epiphytic communities within an *Equisetum fluviatile* L. stand in lake Pääjärvi, Southern Finland. *Int. Revue ges. Hydrobiol.* 1984. Vol. 69, no. 4. P. 475–505.

Karosienė J., Kasperovičienė J. Seasonal succession of epiphyton algal communities on *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud in a mesoeutrophic lake. *Ecologija.* 2008. Vol. 54, no. 1. P. 32–39.

Laugaste R., Reunanen M. The composition and density of epiphyton on some macrophyte species in the partly meromictic Lake Verevi. *Hydrobiologia.* 2005. Vol. 547. P. 137–150.

Meulemans J. T. Seasonal changes in biomass and production on periphyton growing upon reed in Lake

Maarsseveen I. *Archiv für Hydrobiol.* 1988. Vol. 112. P. 21–42.

Müller U. Seasonal development of epiphytic algae on *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud in eutrophic lake. *Archiv für Hydrobiol.* 1994. Vol. 129(3). P. 273–292.

Oleksowicz A. S. Interactions among algal communities in three lakes of the Tuchola Forest area (Northern Poland). *Arch. Hydrobiol. Suppl.* 1982. Vol. 63. P. 77–90.

Roos P. J., Post A. F., Revier J. M. Dynamics and architecture of reed periphyton. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 1981. Vol. 21. P. 948–953.

Tarkowska-Kukuryk M., Mieczan T. Effect of substrate on periphyton communities and relationships among food web components in shallow hypertrophic lake. *J. Limnol.* 2012. Vol. 71(2). P. 279–290. doi: 10.4081/j.limnol.2012.e30

Wetzel R. G. Land-water interfaces: attached microorganisms, littoral algae and zooplankton. *Limnology, Lake and River Ecosystems.* 2001. P. 577–135.

Received March 15, 2019

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Колченко Мария Викторовна

младший научный сотрудник  
Государственный научно-исследовательский институт  
озерного и речного рыбного хозяйства им. Л. С. Берга,  
Псковское отделение  
ул. М. Горького, 13, Псков, Россия, 180007  
эл. почта: marleon@mail.ru

### Станиславская Елена Владимировна

старший научный сотрудник лаб. гидробиологии, к. б. н.,  
доцент  
Институт озероведения РАН  
ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105  
эл. почта: stanlen@mail.ru

## CONTRIBUTORS:

### Kolchenko, Maria

Pskov Department of Berg State Research Institute on Lake  
and River Fisheries  
13 M. Gorky St., 180007 Pskov, Russia  
e-mail: marleon@mail.ru

### Stanislavskaya, Elena

Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences  
9 Sevast'yanova St., 196105 St. Petersburg, Russia  
e-mail: stanlen@mail.ru

УДК 591.524.12:556.555.4 (282.247.211) «2015/2017»

## **ЗООПЛАНКТОН ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА, ЕГО ЦЕНТРАЛЬНОГО ПЛЕСА И ЗАЛИВА БОЛЬШОЕ ОНЕГО В РАЗЛИЧНЫЕ ПО ТЕМПЕРАТУРНОМУ РЕЖИМУ ГОДЫ**

**М. Т. Сярки, Ю. Ю. Фомина**

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

Пелагическая планктонная система Онежского озера, его Центрального плеса и залива Большое Онего обладает высокой структурной и динамической устойчивостью. В статье представлена оценка состояния зоопланктона Онежского озера и его сезонной динамики в условиях различных по температурному режиму лет по данным 2015–2017 гг. В этот период основные свойства зоопланктона, его состав, структура и характерные особенности годовой цикличности сохранились, но наблюдалась повышенная пространственно-временная изменчивость, связанная с особенностями термического режима этих лет. В июле 2016 г. отмечены сдвиги в развитии зоопланктона на более ранний период и экстремально высокие, нехарактерные для этого периода показатели (численность 6,2 тыс. экз./м<sup>3</sup> и биомасса 0,21 г/м<sup>3</sup>). Первая декада августа 2015 г. выделялась низким обилием зоопланктона (численность 1,2 тыс. экз./м<sup>3</sup> и биомасса 0,03 г/м<sup>3</sup>), тот же период в 2017 г. характеризовался повышенным его количеством (численность 7,5 тыс. экз./м<sup>3</sup> и биомасса 0,17 г/м<sup>3</sup>). Численность и биомасса зоопланктона в июне и октябре соответствовали среднемноголетнему состоянию с учетом межгодовых колебаний. Появление экстремально отклоняющихся минимальных и максимальных показателей обилия зоопланктона может свидетельствовать о начальных этапах разбалансировки планктонной системы озера в условиях различных по температурному режиму лет.

**Ключевые слова:** Онежское озеро; температурный режим; пелагический зоопланктон; сезонная динамика; вертикальное распределение.

### **M. T. Syarki, Yu. Yu. Fomina. ZOOPLANKTON OF LAKE ONEGO IN ITS CENTRAL PART AND BOLSHOE ONEGO BAY IN YEARS WITH DIFFERENT TEMPERATURE COMDITIONS**

The pelagic plankton system of Lake Onego, in its central part and Bolshoe Onego Bay, has a high structural and dynamic stability. The purpose of this study was to assess the state of zooplankton in Lake Onego and its seasonal variation in years with different temperature conditions based on data for 2015–2017. The main zooplankton parameters, its composition, structure, and features of the annual cycle have been preserved over this period, but an elevated spatial-temporal variation was observed, associated with the different thermal regimes in these years. In July 2016, zooplankton development shifted to earlier dates and reached extremely high parameters, atypical of this period (abundance of 6,200 ind./m<sup>3</sup> and biomass of 0.21 g/m<sup>3</sup>). The first decade of August 2015 was noted for low amounts of zooplankton (abundance of 1,200 ind./m<sup>3</sup> and bio-

mass of 0.03 g/m<sup>3</sup>), whereas the same period in 2017 was characterized by its elevated amounts (abundance of 7,500 ind./m<sup>3</sup> and biomass of 0.17 g/m<sup>3</sup>). Zooplankton abundance and biomass in June and October corresponded to their long-term averages, taking into account interannual fluctuations. The detection of extremely deviating minimum and maximum zooplankton abundances may indicate that the lake's plankton system is beginning to lose balance in the conditions of temperature differences among years.

**Key words:** Lake Onego; temperature conditions; pelagic zooplankton; seasonal variation; vertical distribution.

## Введение

Климатические колебания в последние десятилетия вызывают заметные изменения в пресноводных экосистемах во всем мире, включая увеличение температуры воды, продолжительности безледоставного периода, «биологического лета», изменения уровня воды, термической стратификации, прозрачности воды [Adrian et al., 2006; Филатов и др., 2012; Hampton et al., 2014]. В Онежском озере отмечена тенденция увеличения безледоставного периода, длительность которого возросла на 20–30 суток [Ефремова, Пальшин, 2017]. Даты перехода температуры поверхности воды через 10 °C сместились на более ранние сроки весной и на более поздние осенью, таким образом, увеличился период «биологического лета» [Филатов и др., 2014].

Зоопланктон, как часть пелагической планктонной системы, является хорошим индикатором ее состояния. Пойкилотермные планктонные организмы чувствительны к температуре воды [Гутельмахер, 1986; Rice et al., 2015], поэтому ее изменения и колебания важны для синхронизации жизненных циклов с сезонными условиями. Воздействие температуры носит сложный комплексный характер и зависит от пространственно-временных масштабов изучаемых процессов. Особенности температурного режима могут проявляться в колебании обилия планктона и его состава [Hampton et al., 2008; Winder et al., 2009], в изменении скорости развития планктонов и их жизненных циклах [Gerten, Adrian, 2002]. Отмечаются также фенологические сдвиги явлений в годовом цикле планктона [Winder, Schindler, 2004; Adrian et al., 2006; Thackeray et al., 2012; Лазарева, Соколова, 2013]. Кроме того, исследования показали, что количественные изменения в зоопланктоне в значительной степени зависят от синоптической ситуации на водоеме во время съемки и в предшествующий период [Куликова и др., 1997; George, 2012].

Анализ сезонных процессов в пелагическом зоопланктоне Центрального плеса и залива

Большое Онего по данным за 1980–2000 гг. показал, что они отличались высокой устойчивостью [Сярки, Чистяков, 2013; Сярки, 2015; Сярки и др., 2015]. В связи с климатическими колебаниями последних лет возникла необходимость оценить современное состояние зоопланктона Онежского озера и его сезонную динамику, что стало целью данной работы.

## Материалы и методы

В работе использованы материалы, полученные в рамках выполнения госзадания ИВПС КарНЦ РАН, а также российско-швейцарского мультидисциплинарного проекта «Lake Lado-ga: life under ice interplay of under-ice processes by global change» 2015–2017 гг. и гранта РФФИ № 14-17-00766 «Онежское озеро и его водосбор: история геологического развития, освоение человеком и современное состояние». Также использовались материалы комплексных гидробиологических съемок на Онежском озере 2015 (июнь, август, октябрь), 2016 (июнь, июль) и 2017 (июль, август, октябрь) годов. Были отобраны пробы зоопланктона на трех станциях в Центральном плесе озера (С1, С2 и С3) и на одной станции в заливе Большое Онего (В1) (рис. 1). Глубина станций В1 и С2 варьировала от 75 до 100 м, станций С1 и С3 – 40–60 м (табл. 1). Районы Центрального плеса и глубоководный залив Большое Онего имеют хороший водообмен, сходны по гидротермическому режиму и трофическим характеристикам [Онежское..., 2010]. Период максимального прогрева поверхностного слоя воды в исследуемых районах наступает в первой декаде августа [Онежское..., 2010; Теканова, Сярки, 2015].

Исследованные годы различались по температурному режиму (табл. 2).

Температура воды определялась с помощью глубоководного зонда CastAway. В августе 2015 г. температура поверхностных слоев воды колебалась по станциям от 14,2 до 16,0 °C. Относительно холодная погода в июле этого года сказалась на температуре воды и ее вертикальном профиле (рис. 2). В августе 2017 г. темпе-

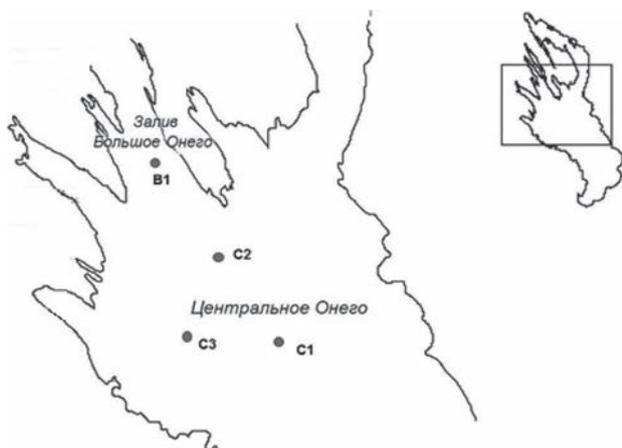


Рис. 1. Карта-схема станций в Центральном плесе и заливе Большое Онего

Fig. 1. The schematic map of stations in the Central part and Bolshoe Onego Bay

Таблица 1. Координаты и средняя глубина станций  
Table 1. Coordinates and average depth of stations

Станция Station	Координаты Coordinates	Средняя глубина, м (мин.-макс.) Average depth, m (min-max)
B1	N62°04.186, E34°51.604	80,7 (70–100)
C1	N61°38.205, E35°28.274	56,4 (50–65)
C2	N61°48.044, E35°04.248	77,2 (70–83)
C3	N61°41.937, E34°58.995	40,5 (40–42)

ратура поверхностных слоев воды была выше, чем в 2015 г., и изменялась по станциям от 15,3 до 17,4 °С. Особенностью 2016 г. является раннее начало прогрева воды. Высокие температу-

ры позволили считать июль 2016 г. теплым. Так, в этот период в Центральном плесе вода нагревалась до 18 °С, а в заливе Большое Онего до 20 °С, что превышает среднемноголетние значения на 4–6 °С.

Зоопланктон обрабатывался стандартными методами [Методические..., 1984; Методика..., 2011]. Уловы производились сетью Джеди диаметром 20 см, с газом 100 мкм. На станциях с глубиной от 40 до 100 м облавливались стандартные горизонты (0–5, 5–10, 10–25, 25–50, 50–75 и далее до дна). Пробы фиксировали 4% формалином. Для расчета биомассы применялся параметр индивидуального веса поло-размерно-возрастных групп для массовых видов, вычисленный общепринятым способом [Куликова, Сярки, 1994].

Для анализа амплитуды сезонных и межгодовых колебаний показателей использовалась информация из базы данных «Зоопланктон Онежского озера» [Сярки, Куликова, 2012], в которой собраны данные по зоопланктону Онежского озера с 1988 по 2011 гг. Использовались данные сетных уловов. Траектории среднемноголетней сезонной динамики были получены с помощью метода скользящего среднего в модификации для нерегулярных рядов с шагом в 7 элементов. Индекс Шеннона – Уивера по численности и биомассе вычислялся по показателям зоопланктона в столбе воды.

## Результаты

В период наблюдений 2015–2017 гг. в зоопланктоне пелагиали Центрального плеса и за-

Таблица 2. Среднемесячные температуры воздуха за 2015–2017 гг. метеостанции г. Петрозаводска\* и среднемесячные температуры воздуха за период 1991–2010 гг. [Назарова, 2014]

Table 2. Average monthly air temperatures for 2015–2017 at the Petrozavodsk meteorological station\* and average monthly air temperatures for the period 1991–2010 [Nazarova, 2014]

Месяц Month	1991–2010	2015	2016	2017
Январь January	-8,5	-7,1	-14,9	-7,3
Февраль February	-9,3	-2,7	-2,3	-7,5
Март March	-3,8	0,7	-1,3	-1,0
Апрель April	2,5	2,2	<b>3,5</b>	0,2
Май May	8,5	10,4	<b>12,7</b>	5,0
Июнь June	13,9	14,2	14,2	11,7
Июль July	17,2	<b>14,3</b>	<b>18,5</b>	15,5
Август August	14,9	15,5	15,3	15,9
Сентябрь September	9,8	11,8	10,0	9,8
Октябрь October	3,8	3,5	2,8	3,2
Ноябрь November	-2,5	0,1	-4,3	-0,2
Декабрь December	-6,2	-1,5	-4,6	-1,9
среднее average	3,4	5,1	4,1	3,6

Примечание. \*По данным сайта www.RP5.ru.

Note. \*According to www.RP5.ru.

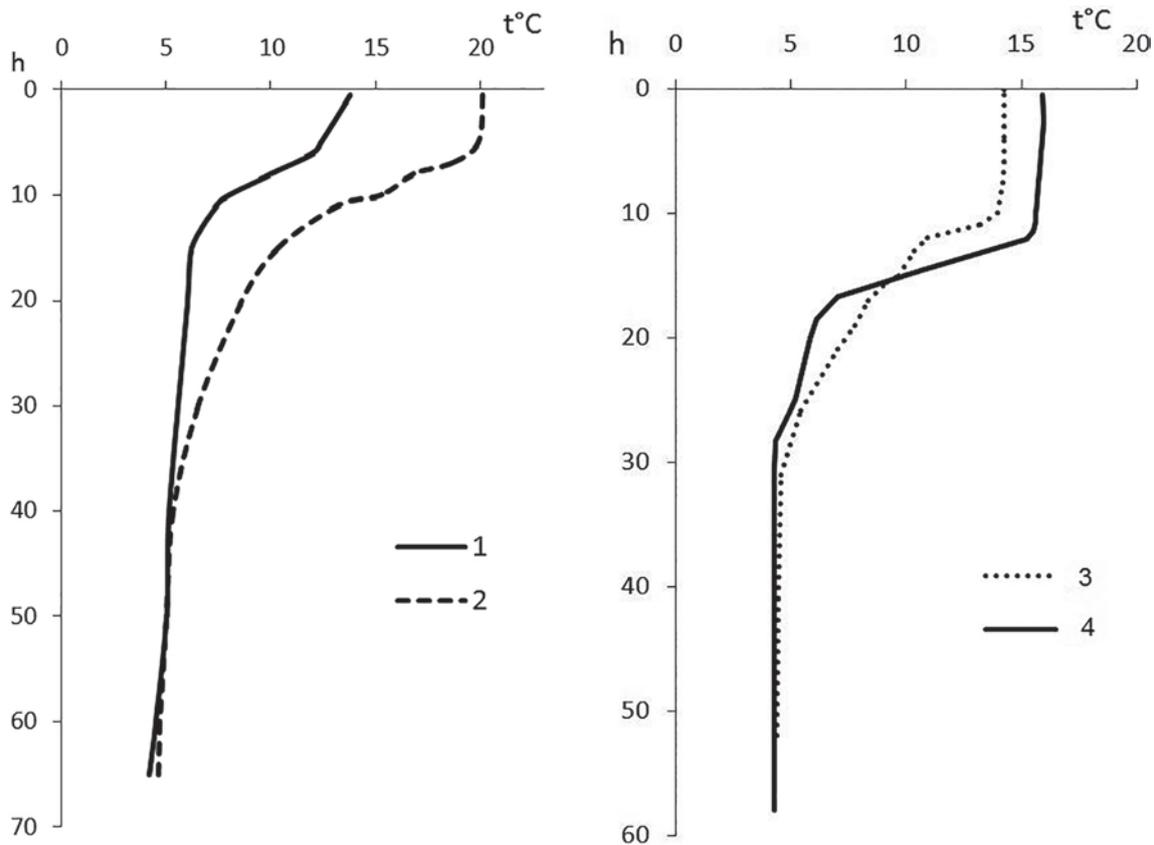


Рис. 2. Температурные профили на станции В1 в июле (слева) и на станции С1 в августе (справа). h – глубина в м:

1 – средний за 1980–2000 гг.; 2 – июль 2016 г.; 3 – август 2015 г.; 4 – август 2017 г.

Fig. 2. Temperature profiles at station B1 in July (left) and station C1 in August (right). h – depth in m:

1 – average for 1980–2000; 2 – July 2016; 2 – August 2015; 4 – August 2017

лива Большое Онего преобладали веслоногие рачки, такие как *Eudiaptomus gracilis* (Sars), *Limnocalanus macrurus* Sars, *Eurytemora lacustris* (Poppe), *Heterocope appendiculata* Sars, *Mesocyclops leuckarti* Claus и *Thermocyclops oithonoides* Sars, *Cyclops lacustris* Sars. В летний период многочисленными были ветвистоусые: *Daphnia cristata* Sars, *Bosmina coregonii lacustris* Leydig, *Limnosida frontosa* Sars и *Chydorus sphaericus* (O. F. Müller). Из коловраток в состав доминирующего комплекса входили: *Kellicottia longispina* (Kellicott), *Keratella cochlearis* (Gosse), *Polyarthra dolichoptera* Idelson и *P. major* Burckhardt, *Asplanchna priodonta* Gosse, виды рода *Conochilus* и *Notholca*. В весенний период многочисленными были виды рода *Synchaeta*. В целом видовой состав зоопланктона пелагиали озера и его доминирующего комплекса остается стабильным с 1960-х годов [Смирнова, 1972].

По данным наблюдений 2015–2017 гг., биоразнообразие, оцененное по индексам Шеннона – Уивера, соответствовало ве-

личинам, характерным для зоопланктона 1980–2000 гг. Показатели индекса колебались в июне по численности от 2,63 до 2,90 тыс. экз./м<sup>3</sup> и по биомассе от 1,87 до 2,14 г/м<sup>2</sup>. В июле обогащение сообщества летними видами, особенно коловратками, повышает индексы – 3,45–3,71 и 2,70–3,01 соответственно. В августе наблюдается максимальное разнообразие рачкового планктона с индексами в 3,30–3,68 и 2,89–3,55, характерными для олиготрофных пелагических систем. Осенью, в связи с исчезновением тепловодных видов и увеличением доли копепод, индексы снижаются до 2,8 по численности и 2,5 по биомассе.

В период исследований 2015–2017 гг. общая численность зоопланктона изменялась от 0,25 тыс. экз./м<sup>3</sup> (14 тыс. экз./м<sup>2</sup>) до 13 тыс. экз./м<sup>3</sup> (760 тыс. экз./м<sup>2</sup>). Общая биомасса варьировала от 0,004 г/м<sup>3</sup> (0,26 г/м<sup>2</sup>) до 0,35 г/м<sup>3</sup> (15 г/м<sup>2</sup>).

Структура, или соотношение основных таксономических групп, зоопланктона изменялась по сезонам. Каждый период имеет харак-

Таблица 3. Структура сообщества зоопланктона по сезонам (средние проценты основных групп за 2015–2017 гг.)

Table 3. The zooplankton community structure by seasons (average percent of main groups for 2015–2017)

	Численность Abundance (%)			Биомасса Biomass (%)		
	Веслоногие Copepods	Ветвистоусые Cladocera	Коловратки Rotifers	Веслоногие Copepods	Ветвистоусые Cladocera	Коловратки Rotifers
Июнь June	92,4	2,2	5,4	97,1	2,4	0,5
Июль July	40,1	20,2	39,6	44,7	17,1	38,2
Август August	48,0	19,8	32,1	49,1	30,9	20,1
Октябрь October	80,3	9,7	10,0	82,9	10,6	6,5

терные особенности и состав [Куликова и др., 1997; Сярки, 2013] (табл. 3).

На станции С2 в июне в изучаемый период биомассы зоопланктона достигали 0,02 г/м<sup>3</sup> (1,43 г/м<sup>2</sup>), что почти в два раза выше средне-многолетних для этого времени. Это связано с тем, что в начале июня 2015 и 2016 гг. термобар уже прошел, поэтому исследованные станции находились в термоактивной зоне. Обычно же термобар приходит в центральную часть озера 15–20 июня [Онежское..., 2010], поэтому в первой декаде июня станции Центрального плеса и залива Большое Онего находятся в термоинертной зоне с температурой воды 2,5–3,5 °С и среднемноголетняя биомасса зоопланктона в это время, как правило, составляет 0,01 г/м<sup>3</sup> (0,81 г/м<sup>2</sup>).

Структура сообщества в изучаемый период была близка к среднемноголетней (табл. 3). В пелагическом зоопланктоне Центрального плеса и залива Большое Онего во все сезоны годового цикла доминируют веслоногие рачки, что характеризует систему как олиготрофную [Андроникова, 1996].

В период съемки в июле 2016 г. температура поверхностных слоев воды в исследуемых районах достигала 18–20 °С при норме 11–12 °С (рис. 2). В таких благоприятных условиях зоопланктон достиг высоких общих показателей как в Центральном плесе – в среднем по численности 4,5 тыс. экз./м<sup>3</sup> (282,9 тыс. экз./м<sup>2</sup>) и по биомассе 0,17 г/м<sup>3</sup> (11,11 г/м<sup>2</sup>), так и в заливе Большое Онего – 3,9 тыс. экз./м<sup>3</sup> (328,4 тыс. экз./м<sup>2</sup>) и 0,13 тыс. экз./м<sup>3</sup> (11,21 тыс. экз./м<sup>2</sup>) соответственно. Показатели обилия в июле 2016 года оказались выше отмеченных ранее для этого времени по численности в 1,5 раза, по биомассе – в 2–4 раза.

Высокие температуры в июле 2016 г. способствовали активному развитию ветвистоусых рачков, доля которых в верхних слоях уже

достигала 20–30 %. Обычно малочисленный в это время рачок *Daphnia cristata* достигал 19 % общей численности и 26 % биомассы, продолжалось активное развитие популяции, доля молодежи составляла до 70 % численности. Кроме рачка *Daphnia* многочисленными были *Eudiatomus gracilis* и *Thermocyclops oithonoides* (>10 % общей численности по станции).

В августе 2015 г. отмечены низкие количественные показатели, причем в заливе Большое Онего численность и биомасса были достоверно ниже среднемноголетних значений, в Центральном плесе находились в пределах межгодовой изменчивости (табл. 4). В августе 2017 г., напротив, зафиксированы высокие значения численности и биомассы. Преобладание в структуре сообщества по численности и биомассе веслоногих рачков и увеличение доли ветвистоусых по биомассе в 2015 и 2017 гг. (табл. 3) характерно для данного периода.

В осенний период происходит постепенное снижение обилия зоопланктона. Так, в октябре 2015 и 2017 гг. показатели варьировали по численности в пределах 0,2–1,2 тыс. экз./м<sup>3</sup> (11,8–95,8 тыс. экз./м<sup>2</sup>) и по биомассе – 0,003–0,03 г/м<sup>3</sup> (0,24–2,14 г/м<sup>2</sup>). В составе зоопланктона исчезают летние теплолюбивые виды ветвистоусых. Постепенно растет доля веслоногих рачков, и сообщество приближается к зимнему состоянию.

## Обсуждение

Для анализа сезонных процессов в планктоне озера удобнее использовать абсолютные величины в столбе воды, которые связаны с продукционно-деструкционными процессами. Но нельзя упускать из виду вертикальную неоднородность показателей зоопланктона, ярко выраженную в условиях летней стратификации вод. Вертикальное распределение продиктовано температурными и трофическими условия-

Таблица 4. Количественные показатели зоопланктона в первой декаде августа 2015 и 2017 гг. и средние за тот же период 1989–2011 гг.

Table 4. Zooplankton quantitative values in the first decade of August 2015 and 2017, and average for the same period 1989–2011

	Численность, тыс. экз./м <sup>2</sup> Abundance, th. ind.·m <sup>-2</sup>			Биомасса, г/м <sup>2</sup> Biomass, g·m <sup>-2</sup>		
	2015 г.	2017 г.	1989–2011 гг.	2015 г.	2017 г.	1989–2011 гг.
Центральный плес Central part	158,8	329,2	300,9 ± 84,3	4,32	8,69	8,13 ± 1,76
Залив Большое Онего Bolshoe Onego Bay	79,4	358,7	323,3 ± 31,8	2,15	9,29	8,54 ± 1,14

ми в эпилимнионе и гиполимнионе, а также биологическими особенностями планктонных животных, их взаимоотношениями и миграциями. Обычно в летний период в слое 0–5 м сосредоточено до 70–80 % общей численности и более 60 % общей биомассы зоопланктона [Куликова и др., 1997; Сярки, 2010].

Чтобы объяснить различия в состоянии зоопланктона в августе 2015 и 2017 гг., был проведен анализ его вертикального распределения. Так, на станции С1 в августе 2017 г. наблюдалось типично летнее состояние (рис. 3). Иная ситуация отмечалась в августе 2015 г. – здесь зафиксировано необычное распределение по вертикали с концентрацией организмов в слое 5–10 м. При этом коловратки и ветвистоусые рачки занимали заметно меньшую долю в сообществе. Интересно, что сходное вертикальное распределение зоопланктона было на всех изученных станциях, в том числе и в заливе Большое Онего, где отмечались минимальные показатели зоопланктона за весь период наблюдений. Возможно, холодная погода в июле 2015 г. затормозила процесс прогрева воды и изменила температурный профиль (рис. 2), и это сказалось на вертикальном распределении зоопланктона и его общем количестве.

Кроме анализа вертикального распределения зоопланктона было выполнено сравнение полученных данных со среднемноголетней сезонной динамикой зоопланктона. В районе исследований сезонная динамика зоопланктона характеризуется высокой степенью воспроизводимости на протяжении многих лет наблюдений. Это связано с большой инертностью водных масс по отношению к внешним факторам воздействия. В предшествующие годы нами были выявлены основные закономерности сезонной динамики зоопланктона в исследуемых районах озера [Куликова и др., 1997; Сярки, Чистяков, 2013; Сярки, 2013, 2015; Сярки и др., 2015]. Наблюдаемые сроки сезонных явлений определяются главным образом температурным фактором, в то время как показатели оби-

лия планктона связаны с трофическими условиями. Анализ с помощью метода аппроксимации выявил, что межгодовая изменчивость сезонной динамики показателей в 2–3 раза меньше внутригодовой изменчивости, и это доказывает высокую устойчивость годового цикла планктона в районе исследования [Сярки и др., 2015].

Наблюдения последних трех лет показали высокую вариабельность зоопланктона в этот период (рис. 4). Общая численность зоопланктона по годам различалась в 7,4 раза (от 79 до 592 тыс. экз./м<sup>2</sup>), а биомасса – в 5,7 раза (от 2,2 до 12,5 г/м<sup>2</sup>). Возможно, причиной подобных колебаний является различие термического режима сравниваемых лет.

В последнее десятилетие наблюдается сдвиг весенних явлений. Так, биомассы зоопланктона в первой декаде июня выше, чем в те же сроки в прошлом веке. Можно сравнить реакцию зоопланктона на раннюю весну 2016 и 1989 гг. Весь вегетационный период 1989 г. наблюдались значительные сдвиги сезонных явлений в планктоне на более ранние сроки [Куликова и др., 1997], что сказалось также на продуктивности сообщества. Так, биомасса зоопланктона в июне 1989 г. на станции В1 достигала 1,7 г/м<sup>2</sup> и была сопоставима с показателями 2015 и 2016 гг.

Реакция зоопланктона на высокую температуру воды в июле 2016 г. имеет сходство с показателями сообщества в июле 2006 г. Тогда наблюдалась высокая численность молодежи рачка *Eudiaptomus gracilis*. В 2016 г. многочисленными были и другие виды рачкового планктона. Интересно, что аналогичная реакция зоопланктона на высокую температуру воды июня–июля 2016 г. отмечалась в том числе и в крупных заливах [Фомина, Сярки, 2018].

Сообщество в августе 2015 г. отличалось низким обилием. По количественным и структурным показателям оно было сходным с состоянием зоопланктона второй половины августа 1995 г. Тогда на станции В1 численность зоопланктона составляла всего 150 тыс. экз./м<sup>2</sup>, а биомасса 6,4 г/м<sup>2</sup>, и это были минимальные

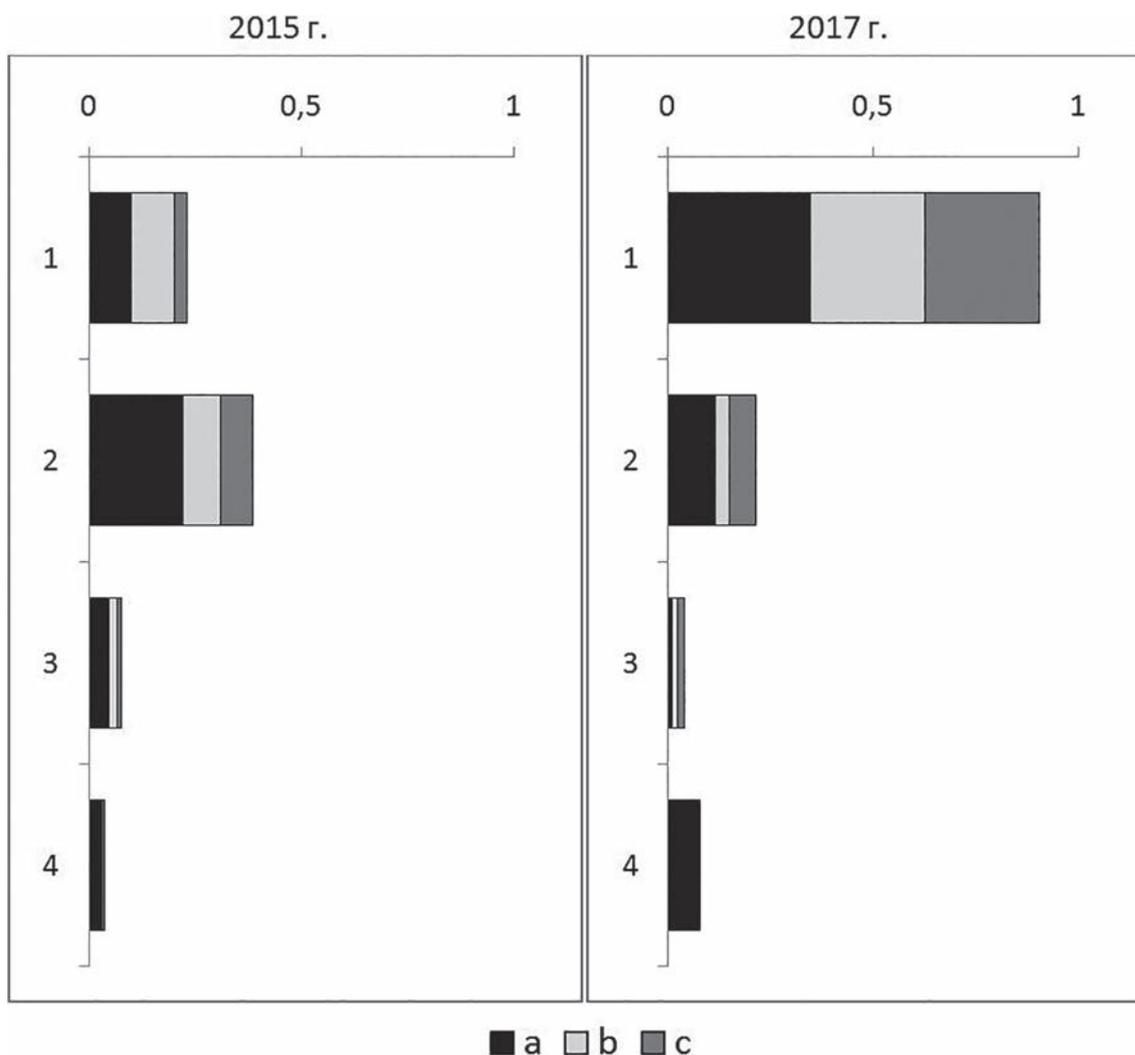


Рис. 3. Вертикальное распределение общей биомассы ( $\text{г}/\text{м}^3$ ) зоопланктона и его основных групп на станции С1 по слоям в августе 2015 и 2017 гг.:

а – веслоногие; б – ветвистоусые; с – коловратки.

Слои: 1 – 0–5 м; 2 – 5–10 м; 3 – 10–25 м; 4 – 25 – дно

Fig. 3. Vertical biomass distribution ( $\text{g}/\text{m}^3$ ) of zooplankton and its groups at station C1 by layers in August 2015 and 2017:

a – Copepods; b – Cladocera; c – Rotifers.

Layers: 1 – 0–5 m; 2 – 5–10 m; 3 – 10–25 m; 4 – 25 – bottom

значения для августа за весь период наблюдений. Показатели 2015 года установили новый минимум (общая численность 79 тыс. экз./ $\text{м}^2$  и биомасса 2,2  $\text{г}/\text{м}^2$ ) на фоне средних для этого периода августа величин в 1980–1990-х годах (соответственно 350 тыс. экз./ $\text{м}^2$  и 10,0  $\text{г}/\text{м}^2$ ).

Повышенная изменчивость количественных показателей зоопланктона в первой декаде августа последних трех лет может быть вызвана различными причинами. Прежде всего это температурный режим и трофическая ситуация. Низкие показатели 2015 г. могут объясняться задержкой в прогреве воды в июле этого года. Высокие показатели обилия зоопланктона

на станции В1 кроме температуры определяются кормовыми условиями. Отмечаются случаи выноса в акваторию залива Большое Онего сточных вод Кондопожского ЦБК, которые вызывают стохастическую вариабельность показателей планктонных сообществ [Сабылина, 1999; Сярки, Теканова, 2008].

### Заключение

Пелагическая планктонная система Центрального плеса и залива Большое Онего обладает высокой структурной и динамической устойчивостью. В 2015–2017 гг. основные

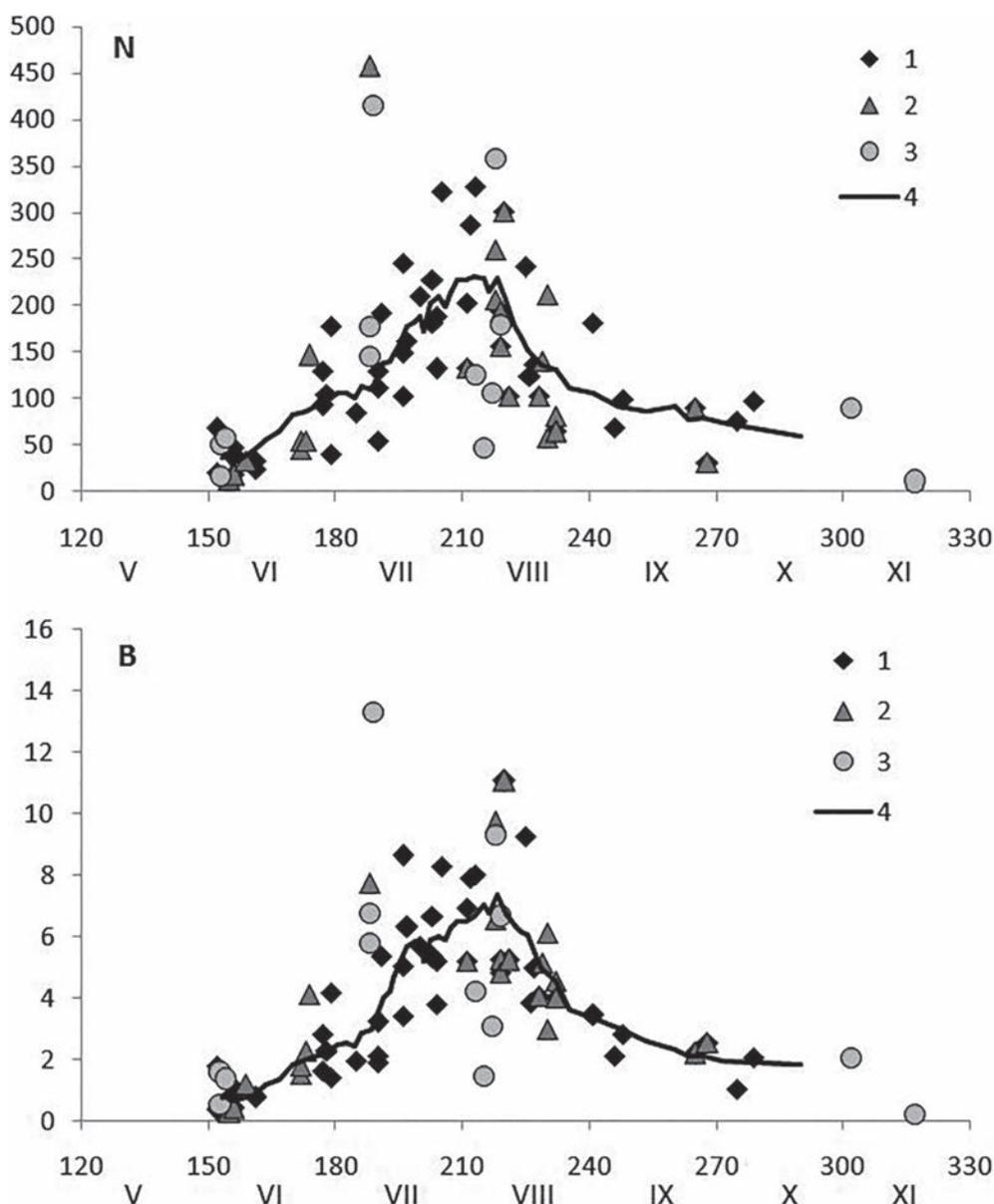


Рис. 4. Сезонное распределение общей численности (N, тыс. экз./м<sup>2</sup>) и биомассы (B, г/м<sup>2</sup>) рачкового планктона Центрального плеса и залива Большое Онего в разные периоды:

1 – 1980–1990-е гг.; 2 – 2001–2014 гг.; 3 – данные 2015, 2016 и 2017 гг.; 4 – среднееголетняя траектория сезонной динамики для данных прошлого века

Fig. 4. Seasonal distribution of total abundance (N, th. ind./m<sup>2</sup>) and biomass (B, g/m<sup>2</sup>) of crustacean plankton in the Central part and Bolshoe Onego Bay in different periods:

1 – 1980–1990s.; 2 – 2001–2014; 3 – data of 2015, 2016 and 2017; 4 – long-term average annual trajectory of the seasonal dynamics of the last century data

свойства зоопланктона, его состав, структура и характерные особенности годовой цикличности сохранились, но наблюдалась повышенная пространственно-временная изменчивость, связанная с особенностями термического режима этих лет. В июле 2016 г. были отмечены сдвиги на более ранний период в развитии зоопланктона и экстремально высокие, нехарактерные для этого периода показате-

ли (численность 6,2 тыс. экз./м<sup>3</sup> и биомасса 0,21 г/м<sup>3</sup>). Первая декада августа 2015 г. выделялась низким обилием зоопланктона (численность 1,2 тыс. экз./м<sup>3</sup> и биомасса 0,03 г/м<sup>3</sup>), тот же период в 2017 г. характеризовался повышенным его количеством (численность 7,5 тыс. экз./м<sup>3</sup> и биомасса 0,17 г/м<sup>3</sup>). В изученные годы в июне и октябре показатели численности и биомассы зоопланктона соответствовали их

среднемноголетнему состоянию с учетом межгодовых колебаний. Появление экстремально отклоняющихся минимальных и максимальных показателей обилия зоопланктона может свидетельствовать о начальных этапах разбалансировки планктонной системы озера в условиях различных по температурному режиму лет.

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

*В работе использованы материалы, полученные в рамках выполнения российско-швейцарского мультидисциплинарного проекта «Lake Ladoga: life under ice interplay of under-ice processes by global change» 2015–2017 гг. и гранта РНФ № 14-17-00766 «Онежское озеро и его водосбор: история геологического развития, освоение человеком и современное состояние».*

## Литература

- Андроникова И. Н.* Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем. СПб.: Наука, 1996. 190 с.
- Гутельмахер Б. Л.* Метаболизм планктона как единого целого: трофометаболические взаимоотношения зоо- и фитопланктона. Л.: Наука, 1986. 155 с.
- Ефремова Т. В., Пальшин Н. И.* Ледовая фенология и термическая структура озер северо-запада России в период ледостава (по данным многолетних наблюдений) // Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Материалы 1-й Междунар. конф. (11–15 сент. 2017 г.). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. С. 222–228.
- Куликова Т. П., Кустовлянкина Н. Б., Сярки М. Т.* Зоопланктон как компонент экосистемы Онежского озера. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1997. 112 с.
- Куликова Т. П., Сярки М. Т.* Размерно-весовая характеристика массовых видов ракообразных и коловраток Онежского озера (справочно-информационный материал). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1994. 16 с.
- Лазарева В. И., Соколова Е. А.* Динамика и фенология зоопланктона крупного равнинного водохранилища: отклик на изменение климата // Успехи современной биологии. 2013. Т. 133, № 6. С. 564–574.
- Методика комплексного гидрохимического и биологического исследования качества вод и состояния водных и околотовных экосистем: методическое руководство. Ч. 1. Полевые исследования / Под ред. Т. И. Моисеенко. Тюмень: Изд-во Тюменского гос. ун-та, 2011. 63 с.*
- Методические рекомендации по сбору и обработке материалов в гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зоопланктон и его продукция / Ред. Г. Г. Винберг, Г. М. Лаврентьева. Л.: ГосНИОРХ, 1984. 33 с.*
- Назарова Л. Е.* Изменчивость средних многолетних значений температуры воздуха в Карелии // Изв. РГО. 2014. Т. 146, № 4. С. 27–33.
- Онежское озеро. Атлас / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.*
- Сабылина А. В.* Современный гидрохимический режим озера // Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. С. 58–109.
- Смирнова Т. С.* Планктонные коловратки и ракообразные // Зоопланктон Онежского озера. Л.: Наука, 1972. С. 126–233.
- Сярки М. Т.* Зоопланктон // Онежское озеро. Атлас / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. С. 117–119.
- Сярки М. Т.* Зоопланктон // Крупнейшие озера-водохранилища северо-запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 121–127.
- Сярки М. Т.* Как долго длится лето для зоопланктона Онежского озера? // Принципы экологии. 2013. № 4. С. 70–75. doi: 10.15393/j1.art.2013.2781
- Сярки М. Т., Куликова Т. П.* «Зоопланктон Онежского озера». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2012621150. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем Карельского научного центра РАН (ИВПС КарНЦ РАН) (RU). Дата регистрации в реестре баз данных 9 ноября 2012 г.
- Сярки М. Т., Чистяков С. П.* О применении метода ортогональных расстояний для моделирования сезонной динамики планктона Онежского озера // Экология. 2013. № 3. С. 234–236.
- Сярки М. Т., Теканова Е. В.* Сезонный цикл первичной продукции в Онежском озере // Изв. РАН. Сер. биол. 2008. № 5. С. 621–625.
- Сярки М. Т., Теканова Е. В., Калинкина Н. М., Полякова Т. П.* Разработка подходов к оценке устойчивости функционирования водных сообществ // Крупнейшие озера-водохранилища северо-запада европейской территории России. Современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 133–145.
- Теканова Е. В., Сярки М. Т.* Особенности фенологии первично-продукционного процесса в пелагиали Онежского озера // Изв. РАН. Сер. биол. 2015. № 6. С. 645–652.
- Филатов Н. Н., Назарова Л. Е., Георгиев А. П., Семенов А. В., Анциферова А. Р., Ожигина В. Н., Богданова М. И.* Изменения и изменчивость климата Европейского Севера России и их влияние на водные объекты // Арктика: экология и экономика. 2012. № 2(6). С. 80–93.
- Филатов Н. Н., Руховец Л. А., Назарова Л. Е., Георгиев А. П., Ефремова Т. В., Пальшин Н. И.* Влияние изменения климата на экосистемы озер Севера Европейской территории России // Ученые записки РГГМУ. 2014. № 34. С. 48–55.
- Фомина Ю. Ю., Сярки М. Т.* Современное состояние зоопланктона Петрозаводской губы Онежского

озера и его отклик на изменение климата // Труды КарНЦ РАН. 2018. № 9. С. 54–64. doi: 10.17076/lim820

Adrian R., Wilhelm S., Gerten D. Life-history traits of lake plankton species may govern their phenological response to climate warming // *Global Change Biol.* 2006. Vol. 12. P. 652–661.

George D. G. The effect of nutrient enrichment and changes in the weather on the abundance of *Daphnia* in Esthwaite Water, Cumbria // *Freshwater Biol.* 2012. Vol. 57, iss. 2. P. 360–372.

Gerten D., Adrian R. Species-specific changes in the phenology and peak abundance of freshwater copepods in response to warm summers // *Freshwater Biol.* 2002. Vol. 47. P. 2163–2173.

Hampton S. E., Izmet'eva L. R., Moore M. V., Katz S. L., Dennis B., Silow E. A. Sixty years of environmental change in the world's largest freshwater lake – Lake Baikal, Siberia // *Global Change Biol.* 2008. Vol. 14. P. 1947–1958.

Hampton S. E., Gray D. K., Izmet'eva L. R., Moore M. V., Ozersky T. The rise and fall of plankton: long-term changes in the vertical distribution of algae

and grazers in Lake Baikal, Siberia // *PLoS ONE.* 2014. Vol. 9, iss. 2. P. 1–10.

Rice E., Dam H. G., Gillian Stewart G. Impact of climate change on estuarine zooplankton: Surface water warming in long island sound is associated with changes in copepod size and community structure // *Estuaries and Coasts.* January 2015. Vol. 38, iss. 1. P. 13–23.

Thackeray S. J., Henrys P. A., Jones I. D., Feuchtmayr H. Eight decades of phenological change for a freshwater cladoceran: what are the consequences of our definition of seasonal timing? // *Freshwater Biol.* 2012. Vol. 57. P. 345–359.

Winder M., Schindler D. E. Climatic effects on the phenology of lake processes // *Global Change Biol.* 2004. Vol. 10. P. 1844–1856.

Winder M., Schindler D. E., Essington T. E., Litt A. H. Disrupted seasonal clockwork in the population dynamics of a freshwater copepod by climate warming // *Limnol. Oceanogr.* 2009. Vol. 54, no. 6 (part 2). P. 2493–2505.

Поступила в редакцию 30.01.2019

## References

Andronikova I. N. Strukturno-funktional'naya organizatsiya zooplanktona ozernykh ekosistem [Structural and functional organization of zooplankton in lake ecosystems]. St. Peterburg: Nauka, 1996. 190 p.

Filatov N. N., Nazarova L. E., Georgiev A. P., Semenov A. V., Antsiferova A. R., Ozhigina V. N., Bogdan M. I. Izmeneniya i izmenchivost' klimata evropeiskogo Severa Rossii i ikh vliyanie na vodnye ob'ekty [Climate change and variability in the European North of Russia and their impact on water bodies]. *Arktika: ekol. i ekonomika* [The Arctic: ecol. and economics]. 2012. No. 2(6). P. 80–93.

Filatov N. N., Rukhovets L. A., Nazarova L. E., Georgiev A. P., Efremova T. V., Pal'shin N. I. Vliyanie izmeneniya klimata na ekosistemy ozer Severa evropeiskoi territorii Rossii [The impact of climate change on the lakes ecosystems in the North of European Russia]. *Uchenye zapiski RGGMU* [Proceed. RSHU]. 2014. No. 34. P. 48–55.

Fomina Yu. Yu., Syarki M. T. Sovremennoe sostoyanie zooplanktona Petrozavodskoi guby Onezhskogo ozera i ego otklik na izmenenie klimata [Modern state of zooplankton and its response to climate change in Petrozavodsk Bay of Lake Onego]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2018. No. 9. P. 54–64. doi: 10.17076/lim820

Gutel'makher B. L. Metabolizm planktona kak edinogo tselogo: trofometabolicheskie vzaimootnosheniya zoo- i fitoplanktona [Metabolism of plankton as a whole: trophometabolic relationships of zoo- and phytoplankton]. Leningrad: Nauka, 1986. 155 p.

Efremova T. V., Pal'shin N. I. Ledovaya fenologiya i termicheskaya struktura ozer severo-zapada Rossii v period ledostava (po dannym mnogoletnikh nablyudeni) [Ice phenology and thermal structure of the lakes in the north-west of Russia during the freeze-up period (according to long-term observations)]. *Ozera Evrazii: probl. i puti ikh resheniya.* Mat. 1-i Mezhdunar.

konf. (11–15 sent. 2017 g.) [Lakes of Eurasia: problems and their solutions. Proceed. 1<sup>st</sup> int. conf. (Sept. 11–15, 2017)]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2017. P. 222–228.

Kulikova T. P., Kustovlyankina H. B., Syarki M. T. Zooplankton kak komponent ekosistemy Onezhskogo ozera [Zooplankton as a component of the Lake Onega ecosystem]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1997. 112 p.

Kulikova T. P., Syarki M. T. Razmerno-vesovaya kharakteristika massovykh vidov rakoobraznykh i kolovratok Onezhskogo ozera (spravochno-informatsionnyi material) [Size and weight characteristics of mass species of crustaceans and rotifers in Lake Onega (reference and information material)]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1994. 16 p.

Lazareva V. I., Sokolova E. A. Dinamika i fenologiya zooplanktona krupnogo ravninnogo vodokhranilishcha: otklik na izmenenie klimata [Dynamics and phenology of zooplankton in a large plain reservoir: a response to climate changes]. *Uspekhi sovr. biol.* [Biol. Bull. Reviews]. 2013. Vol. 133, no. 6. P. 564–574.

Metodika kompleksnogo gidrokhimicheskogo i biologicheskogo issledovaniya kachestva vod i sostoyaniya vodnykh i okolovodnykh ekosistem: metodicheskoe rukovodstvo. Ch. 1. Polevye issledovaniya [Methods of complex hydrochemical and biological research of water quality and the state of aquatic and riparian ecosystems: a methodological guide. Part 1. Field studies]. Ed. T. I. Moiseenko. Tyumen': Tyumen. gos. univ., 2011. 63 p.

Metodicheskie rekomendatsii po sboru i obrabotke materialov v gidrobiologicheskikh issledovaniyakh na presnovodnykh vodoemakh. Zooplankton i ego produktsiya [Methodological recommendations for sampling and processing materials for hydrobiological research on freshwater reservoirs. Zooplankton and its production]. Eds. G. G. Vinberg, G. M. Lavrent'eva. Leningrad: GosNIORKh, 1984. 33 p.

Nazarova L. E. Izmenchivost' srednikh mnogoletnikh znachenii temperatury vozdukha v Karelii [Variability

lity of average long-term air temperature values in Karelia]. *Izv. RGO* [The RGS Herald]. 2014. Vol. 146, no. 4. P. 27–33.

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

Sabylina A. V. Sovremennyy gidrokhimicheskii rezhim ozera [Modern hydrochemical regime of a lake]. *Onezhskoe ozero. Ekol. probl.* [Lake Onego. Ecological probl.]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1999. P. 58–109.

Smirnova T. S. Planktonnye kolovratki i rakoobraznye [Plankton rotifers and crustaceans]. *Zooplankton Onezhskogo ozera* [Zooplankton of Lake Onego]. Leningrad: Nauka, 1972. P. 126–233.

Syarki M. T. Zooplankton [Zooplankton]. *Onezhskoe ozero* [Lake Onego]. Ed. N. N. Filatov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2010. P. 117–119.

Syarki M. T. Zooplankton [Zooplankton]. *Krupneishie ozera-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh* [The largest lakes-reservoirs of the north-western European part of Russia: current state and changes of ecosystems under climate variability and anthropogenic impact]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. P. 121–127.

Syarki M. T. Kak dolgo dlitsya leto dlya zooplanktona Onezhskogo ozera? [How long does the summer last for zooplankton of Lake Onego?]. *Printsipy ekol.* [Principles of the Ecol.]. 2013. No. 4. P. 70–75. doi: 10.15393/j1.art.2013.2781

Syarki M. T., Kulikova T. P. Zooplankton Onezhskogo ozera. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii bazy dannykh № 2012621150. Pravoobladatel': Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe uchrezhdenie nauki Institut vodnykh problem Severa Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN (IVPS KarNTs RAN) (RU). Data registratsii v reestre baz dannykh 9 noyabrya 2012 g. [Zooplankton of Lake Onego. The certificate of the state registration of database No. 2012621150. Copyright holder: FSBI Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (NWPI KarRC RAS) (RU). The date of the registration in the register of databases: 9.11.2012].

Syarki M. T., Chistyakov S. P. O primeneniya metoda ortogonal'nykh rasstoyanii dlya modelirovaniya sezonnoi dinamiki planktona Onezhskogo ozera [On application of the orthogonal distance method to Lake Onego plankton seasonal cycling modelling]. *Russ. J. Ecol.* 2013. Vol. 44, no. 3. P. 264–266. doi: 10.1134/S1067413613020112

Syarki M. T., Tekanova E. V. Sezonnyi tsikl pervichnoi produktzii v Onezhskom ozere [Seasonal primary production cycle in Lake Onego]. *Biol. Bull.* 2008. Vol. 35, no. 5. P. 536–540.

Syarki M. T., Tekanova E. V., Kalinkina N. M., Polyakova T. P. Razrabotka podkhodov k otsenke ustoychivo-

sti funktsionirovaniya vodnykh soobshchestv [Development of approaches to assess the sustainability of water communities functioning]. *Krupneishie ozera-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh* [The largest lakes-reservoirs of the north-western European part of Russia: current state and changes of ecosystems under climate variability and anthropogenic impact]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. P. 133–145.

Tekanova E. V., Syarki M. T. Osobennosti fenologii pervichno-produktsionnogo protsessa v pelagiali Onezhskogo ozera [Peculiarities of phenology of the primary production process in the pelagic zone of Lake Onego]. *Biol. Bull.* 2015. Vol. 42, no. 6. P. 556–562.

Adrian R., Wilhelm S., Gerten D. Life-history traits of lake plankton species may govern their phenological response to climate warming. *Global Change Biol.* 2006. No. 12. P. 652–661.

George D. G. The effect of nutrient enrichment and changes in the weather on the abundance of *Daphnia* in Esthwaite Water, Cumbria. *Freshwater Biol.* 2012. Vol. 57, iss. 2. P. 360–372.

Gerten D., Adrian R. Species-specific changes in the phenology and peak abundance of freshwater copepods in response to warm summers. *Freshwater Biol.* 2002. Vol. 47. P. 2163–2173.

Hampton S. E., Izmet'eva L. R., Moore M. V., Katz S. L., Dennis B., Silow E. A. Sixty years of environmental change in the world's largest freshwater lake – Lake Baikal, Siberia. *Global Change Biol.* 2008. Vol. 14. P. 1947–1958.

Hampton S. E., Gray D. K., Izmet'eva L. R., Moore M. V., Ozersky T. The rise and fall of plankton: long-term changes in the vertical distribution of algae and grazers in Lake Baikal, Siberia. *PLoS ONE.* 2014. Vol. 9, iss. 2. P. 1–10.

Rice E., Dam H. G., Gillian Stewart G. Impact of climate change on estuarine zooplankton: Surface water warming in long island sound is associated with changes in copepod size and community structure. *Estuaries and Coasts.* 2015. Vol. 38, iss. 1. P. 13–23.

Thackeray S. J., Henrys P. A., Jones I. D., Feuchtmayr H. Eight decades of phenological change for a freshwater cladoceran: what are the consequences of our definition of seasonal timing? *Freshwater Biol.* 2012. No. 57. P. 345–359.

Winder M., Schindler D. E. Climatic effects on the phenology of lake processes. *Global Change Biol.* 2004. No. 10. P. 1844–1856.

Winder M., Schindler D. E., Essington T. E., Litt A. H. Disrupted seasonal clockwork in the population dynamics of a freshwater copepod by climate warming. *Limnol. Oceanogr.* 2009. Vol. 54, no. 6 (part 2). P. 2493–2505.

Received January 30, 2019

## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

### **Сярки Мария Тагевна**

старший научный сотрудник лаб. гидробиологии, к. б. 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: Msyarki@yandex.ru  
тел.: (8142) 576381

### **Фомина Юлия Юрьевна**

научный сотрудник лаборатории гидробиологии  
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185030  
эл. почта: Rambler7780@rambler.ru  
тел.: (8142) 576381

## **CONTRIBUTORS:**

### **Syarki, Maria**

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

### **Fomina, Yulia**

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: Rambler7780@rambler.ru  
tel.: (8142) 576381

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 574.5

### МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВНУТРЕННЕЙ БИОГЕННОЙ НАГРУЗКИ ВОДОЕМОВ (ОБЗОР)

**Ю. С. Даценко**

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Россия*

Внутренняя биогенная нагрузка пресноводных водоемов является ключевым звеном в изучении и моделировании процессов эвтрофирования озер и водохранилищ. Представлен краткий обзор основных методов определения внутренней биогенной нагрузки водоемов. Все применяемые методы разделены на экспериментальные и расчетные. К числу экспериментальных методов отнесены прямые лабораторные определения потоков на границе вода – донные отложения и определение внутренней нагрузки по балансу биогенных веществ в гипolimнионе. Среди расчетных методов доминируют оценки потоков биогенных веществ из донных отложений, проводимые по расчетам внешнего баланса биогенных веществ в водоеме. К таким же методам отнесены оценки потоков веществ из донных отложений, основанные на определении содержания вещества в различных слоях донных отложений. Отдельно рассматриваются попытки использования эмпирических зависимостей для оценки внутренней нагрузки. Наиболее перспективными методами оценки внутренней нагрузки признаются методы математического моделирования внутриводоемных процессов. Приводятся примеры расчетов биогенной нагрузки. Подчеркиваются преимущества и недостатки каждого из представленных методов.

**Ключевые слова:** внутренняя биогенная нагрузка; поток фосфора из донных отложений; балансовые методы; фосфаты; минеральный азот; математическое моделирование.

### **Yu. S. Datsenko. METHODS FOR ASSESSMENT OF INTERNAL NUTRIENT LOAD OF WATER BODIES (A REVIEW)**

Internal nutrient load of freshwater bodies is a key element in the study and modeling of the processes of eutrophication of lakes and storage reservoirs. A brief review of the main methods for determining the internal nutrient load of water bodies is presented. All the applied methods are divided into experimental and computational. The experimental methods include direct laboratory determination of fluxes at the water-sediment interface and determination of the internal load using the balance of nutrients in the hypolimnion. The prevalent group of computational methods is estimates of nutrient flux-

es from bottom sediments based on the calculation of the external balance of nutrients in the water body. This category of methods also includes estimates of substance fluxes from bottom sediments based on the determination of substance content in different layers of bottom sediments. A separate group considered is attempts to use empirical dependencies to assess the internal load. The most promising methods for estimating the internal load are the methods of mathematical modeling of intrabasin processes. Examples of nutrient load calculations are given. The strengths and weaknesses of each of the presented methods are highlighted.

**Keywords:** internal nutrient load; phosphorus flux from bottom sediments; mass balance methods; phosphates; mineral nitrogen; mathematical modeling.

## **Введение**

Процесс эвтрофирования внутренних водоемов, принявший глобальный характер, уже давно находится в центре внимания лимнологов. Одним из ключевых вопросов в изучении проблемы эвтрофирования признается изменение соотношений потоков биогенных веществ на границе вода – донные отложения, которые формируют внутреннюю биогенную нагрузку на экосистему водоема. Внутренняя биогенная нагрузка на водоем часто отождествляется с поступлением в водоем минеральных форм биогенных веществ из донных отложений. Механизмы потоков со дна в воду подразделяются на диффузионный поток растворенных соединений биогенных веществ и конвективный перенос на границе вода – дно. Конвективный перенос включает ветровое и антропогенное взмучивание, биотурбацию, газоотделение со дна в анаэробных условиях, влияние жизнедеятельности макрофитов, колоний бентических водорослей и придонных рыб, а также ряд других, менее значимых процессов. Ветровое взмучивание донных отложений как источник биогенных веществ имеет важное значение в мелководных водоемах в безледный период. В глубоководных стратифицированных водоемах основным механизмом выделения азота и фосфора из донных отложений остается диффузия их растворенных соединений. Значимость биогенных процессов носит локальный характер и обычно существенно меньше процессов диффузии и конвекции.

Теоретические вопросы накопления, трансформации, миграции биогенных веществ, а также механизмов, формирующих их поток со дна водоемов, наиболее полно рассмотрены в работах М. В. Мартыновой и И. Б. Мизандронцева [Мартынова, 1981, 1984а, б, 1988, 2010; Мизандронцев, 1990; Мартынова и др., 2017].

С практической точки зрения наибольший интерес представляют способы количественной оценки величины потоков биогенных веществ, в первую очередь азота и фосфора,

из донных отложений в воду. Обобщая многочисленные попытки оценки потока биогенных веществ из донных отложений в водную массу водоемов, представленные в основном в отечественной лимнологической литературе, разнообразные методы определения внутренней биогенной нагрузки на экосистему водоема можно подразделить на экспериментальные (лабораторные и полевые) и расчетные.

## **Экспериментальные методы**

### *Метод оценки потока биогенных веществ из донных отложений путем лабораторных экспериментов*

Это наиболее распространенный метод, основанный на прямых наблюдениях за концентрациями биогенных веществ в системе «вода – донные отложения». Состоит в контроле за изменением концентрации биогенного вещества в изолированном объеме воды над донными отложениями. Донные отложения для эксперимента отбираются в водоеме с помощью оборудования, обеспечивающего отбор ненарушенной колонки донных отложений, и инкубируются в трубках. Затем по изменению концентрации в трубках определяется интенсивность потока биогенных веществ из донных отложений в воду. Экспериментальная основа таких методов описана еще в 70-х годах прошлого века [Романенко, Кузнецов, 1974], и до настоящего времени он многократно применялся для прямого измерения интенсивности потоков биогенных веществ из донных отложений [Мартынова, 1981; Лозовик, 1985; Жукова и др., 1990; Бреховских и др., 1999]. Общая схема постановки таких лабораторных экспериментов представлена в работе [Мартынова, Козлова, 1987].

Преимущество этого метода, обеспечившее его распространение, состоит в прямом определении потока биогенного вещества. Один из главных недостатков метода обусловлен необходимостью многократных постановок экспериментов с учетом высокой пространст-

венно-временной изменчивости определяемых величин потоков веществ.

*Метод оценки внутренней нагрузки по балансу биогенных веществ в гиполимнионе водоема*

Этот метод следует отнести к экспериментальным, поскольку для определения интенсивности выноса биогенных веществ из донных отложений требуется реализация специальной программы мониторинга. Метод основан на оценке внутренней биогенной нагрузки по результатам расчета баланса биогенного вещества в воде водоема, при котором поток биогенного элемента из донных отложений рассматривается как неизвестный член баланса. Для надежного расчета балансовых составляющих биогенных веществ в водоеме необходима детальная информация, требующая большого количества определений их концентраций в различных слоях водоема. Задачу можно существенно упростить, если рассматривать относительно обособленный плес водоема в течение периода, когда адвективными составляющими баланса биогенных веществ можно пренебречь. В случае вертикального плотностного расслоения водной массы плеса придонный слой можно считать изолированным и, рассчитав изменение запаса биогенного вещества в нем, оценить интенсивность потока биогенных веществ из донных отложений. Определение объема вод, изолированных изобатой, соответствующей положению термоклина, и измеренные концентрации минеральных форм биогенных веществ позволяют рассчитывать изменения их запаса в воде гиполимниона через определенные промежутки времени. Это изменение, если пренебречь обменом через термоклин, происходит за счет выноса биогенных веществ из донных отложений. Тогда отношение вычисленного изменения массы биогенного вещества к площади поверхности дна плеса дает плотность потока соединений биогенных веществ из донных отложений.

В качестве примера применения такого метода можно привести расчет потоков минерального фосфора в Красновидовском плесе подмосковного Можайского водохранилища в летний период [Даценко, 1998]. Результаты проведенных расчетов хорошо коррелировали с измеренными в этот же период величинами потока фосфора, определенными лабораторным методом.

Этот метод оценки внутренней нагрузки позволяет определять изменчивость выноса фосфора в зависимости от колебаний вертикаль-

ной гидрологической структуры водной массы плеса в результате смены синоптических условий. В различные годы соотношение внешней и внутренней летней нагрузки может существенно различаться. В холодное и дождливое лето приток фосфора в водохранилище с речными водами повышен, а его вынос из донных отложений менее интенсивен. Напротив, в жаркое лето роль внутренней нагрузки водохранилища фосфором резко повышается.

Преимущество метода состоит в возможности интегральной оценки выноса и учета изменения вертикальной структуры водной массы водоема. Недостаток метода связан с пренебрежением обменом через термоклин и адвекцией биогенных веществ (если рассматривается отдельный плес водоема). Определенные сложности может вызвать выбор периода специальных учащенных наблюдений за распределением фосфатов по вертикали, который должен соответствовать минимуму горизонтальной адвекции.

### Расчетные методы

*Интегральная оценка внутренней нагрузки по балансовым уравнениям Фолленвейдера*

Интегральную оценку внутренней нагрузки можно получить, используя широко распространенную среди лимнологов стационарную модель эвтрофирования водоемов [Vollenweider, 1975].

В балансовых уравнениях Р. Фолленвейдера величина биогенной нагрузки на водоем определяется с учетом суммарной нагрузки (внешней и внутренней). Попытку разделить в этих моделях внешнюю и внутреннюю нагрузку предпринял Дж. Нюрнберг [Nurnberg, 1984], представив балансовое уравнение с учетом внутренней нагрузки в виде:

$$P = P_{\text{вх}} \cdot (1 - R) + \frac{LP_{\text{внут}}}{h \cdot K_B}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{вх}}$  и  $P$  – концентрация биогенного вещества на входе в водоем и в водоеме соответственно,  $\text{г м}^{-3}$ ;  $LP_{\text{внут}}$  – внутренняя биогенная нагрузка водоема,  $\text{г м}^{-2} \text{год}^{-1}$ ;  $P$  – концентрация фосфора в водоеме,  $\text{г м}^{-3}$ ;  $R$  – коэффициент удержания фосфора;  $K_B$  – коэффициент водообмена водоема,  $\text{год}^{-1}$ ;  $h$  – глубина водоема, м.

Тогда внутреннюю нагрузку ( $LP_{\text{внут}}$ ) можно рассчитать при известной концентрации фосфора в водоеме. Но в этом случае величина  $R$  должна характеризовать осаждение фосфора, поступающего в водоем только из внешних источников. При оценках суммарных величин притока и стока фосфора разделить внешние

и внутренние его источники в водоеме невозможно. Поэтому Дж. Нюрнберг предложил для оценки величины  $R$  использовать эмпирическую формулу, полученную им по расчетам фосфорного баланса только в нестратифицированных, малопродуктивных озерах, где внутренняя нагрузка, по мнению автора, пренебрежимо мала. Эта формула имеет вид:

$$R = \frac{15}{18 + h \cdot K_B} \quad (2)$$

Проведенные автором формулы расчеты показали небольшую чувствительность их результатов к эмпирическим оценкам величины удержания фосфора для одного конкретного озера. В таких расчетах, по-видимому, большое значение имеет надежность оценки среднесуточной концентрации фосфора в водоеме и его концентрации в притоке, которая может быть обеспечена только очень частыми регулярными наблюдениями за концентрациями биогенных веществ как в самом водоеме, так и в его притоках.

Еще один способ расчета, основанный на уравнении Р. Фолленвейдера, рассмотрен в работе Е. Уэлча и Г. Кука [Welch, Cooke, 1996].

Если балансовое уравнение Р. Фолленвейдера представить с учетом внутренней нагрузки в виде

$$W \frac{dP}{dt} = \frac{LP_{внеш}}{h} - K_B \cdot P - K_S \cdot W \cdot P + \frac{LP_{внут}}{h}, \quad (3)$$

где  $W$  – объем водоема, м<sup>3</sup>;  $K_S$  – коэффициент седиментации фосфора, год<sup>-1</sup> (остальные обозначения те же, что и в уравнении (1)), то при наличии известных значений  $K_S$  можно рассчитать величину концентрации фосфора  $P$  по интервалам времени. Тогда, сопоставив результаты расчета концентрации фосфора с измеренными ее значениями, величину  $LP_{внут}$  можно откалибровать. Пример оценки внутренней биогенной нагрузки с применением такой калибровки приведен в работе В. Перкинса с соавторами [Perkins et al., 1997] для озера Саммамиш (Южная Африка). Сложности такого расчета очевидны – результаты оказываются очень чувствительны к измеренным значениям коэффициента седиментации и величине средней концентрации фосфора в озере. Приведенный пример относится к хорошо изученному озеру и является пока единственным случаем реализации подобной методики оценки внутренней нагрузки.

Преимущества рассмотренных балансовых методов состоят в простоте расчетов, а недостатки – в необходимости использовать очень надежные данные мониторинга биогенных веществ водоема.

#### Расчет выноса биогенных веществ по балансу потоков в донных отложениях

Метод предложен в Институте озероведения РАН Н. В. Игнатъевой [1997, 2002]. В основе метода – баланс основных потоков вещества на границе раздела вода-дно. При этом используется предположение о наличии слоев отложений, обладающих определенными признаками функционирования экосистемы водоема, которое было высказано Э. Науманном еще в начале 30-х годов прошлого века.

За активный слой принимается верхний, примерно 10–15-см слой осадка, активно участвующий в обменных процессах. Поток захоронения оценивается по концентрации биогенного элемента в слое глубже 15 см, в котором предполагается стабилизация содержания фосфора.

Величина внутренней нагрузки биогенного элемента (фосфора и азота) из донных отложений в воду ( $J$ ) оценивается как разность между потоком седиментации на поверхность донных отложений ( $S$ ) и потоком захоронения в толще осадка ( $B$ ):

$$J = S - B. \quad (4)$$

Расчет потоков седиментации и захоронения биогенных элементов выполняется по формуле:

$$S, B = \frac{TP(TN)_x \cdot V_{oc} \cdot d \cdot (1-p) \cdot 10^3}{365}, \quad (5)$$

где  $S$  – плотность потока седиментации фосфора (азота) на поверхность донных отложений, мг  $P(N)$  м<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup>;  $B$  – плотность потока захоронения фосфора (азота) в донных отложениях, мг  $P(N)$  м<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup>;  $TP(TN)_x$  – содержание общего фосфора (азота) на глубине  $x$  в осадке, мг  $P(N)$  г<sup>-1</sup> (сухого осадка),  $x = 0$  см при расчете потока седиментации, то есть поверхностный слой осадка толщиной от 0 до 0,2 см,  $x = 10–15$  см – нижняя граница «активного» слоя, которая определяется по характеру вертикального распределения биогенного элемента в колонке донных отложений;  $V_{oc}$  – скорость осадконакопления, мм год<sup>-1</sup>;  $d$  – удельная масса сухого осадка, г см<sup>-3</sup>;  $p$  – пористость осадка.

Данный метод был успешно применен для оценки внутренней биогенной нагрузки на Ладожское озеро, а также в Онежском озере [Белкина, 2005] и озерах Карелии [Белкина, 2011]. Наиболее детальные расчеты внутренней нагрузки выполнены этим методом для Псковско-Чудского озера [Игнатъева, 2014].

Примерно такой же принцип оценки внутренней нагрузки, основанный на определении

соотношений концентраций фосфора в различных слоях, реализован в расчетах потоков фосфора из донных отложений в водоемах Чувашии [Осмелкин, 2018]. Соотношение концентраций позволяет оценить величину поступления и аккумуляции фосфора в водоеме, а оценка выноса его из донных отложений определяется по разности этих потоков. Преимущество метода состоит в простоте и наглядности расчетов.

#### *Расчет биогенной нагрузки по уравнению Фика*

Теоретически диффузионное перемещение растворенных веществ в донных отложениях подчиняется первому закону Фика:

$$J = -D \cdot \frac{dC}{dx}, \quad (6)$$

где  $J$  – величина диффузионного потока,  $\text{г м}^{-2} \text{сут}^{-1}$ ;  $C$  – концентрация биогенного элемента,  $\text{г м}^{-3}$ ;  $D$  – коэффициент диффузии,  $\text{м}^2 \text{сут}^{-1}$ .

Концентрации азота и фосфора в поровом растворе донных отложений определяются скоростью минерализации органических веществ в донных отложениях. В случае, когда концентрацией соединения в природной воде по сравнению с ее концентрацией в поровом растворе можно пренебречь, градиент концентрации может приниматься равным по величине концентрации вещества в поровом растворе. Коэффициент диффузии зависит от многих разнообразных факторов: диаметра и длины пор, температуры, заряда и массы. Сложность его надежной оценки существенно ограничивает практическое применение этого метода, несмотря на его строгую физическую обоснованность. Некоторые значения коэффициентов диффузии приводятся в монографии С. И. Кузнецова [1970], но, как правило, эти значения берутся из работы В. Ли и С. Грегори [Li, Gregory, 1974]. Иногда для расчетов выноса используется величина коэффициента диффузии, полученная для морских илов. Этот метод расчета по уравнению Фика был успешно использован для определения внутренней биогенной нагрузки Таганрогского залива Азовского моря [Жидкова, Гусакова, 2017], но в целом примеров расчета потоков биогенных веществ из донных отложений в литературе немного.

#### *Расчет поступления биогенных веществ по эмпирическим зависимостям*

Для оценки внутренней нагрузки предпринимались попытки использовать простейшие методы эмпирических зависимостей. Ме-

тод, предложенный Е. В. Неверовой-Дзиопак [2003], относится только к выносу из донных отложений минерального азота. Этот метод основан на использовании установленной зависимости интенсивности потока минерального азота от весового отношения концентрации углерода к концентрации азота  $C/N$ . Чем ниже отношение, тем больший процент в продуктах распада органических веществ составляет аммонийный азот  $\text{NH}_4^+$ , т. е. величина потока азота из донных отложений в воду возрастает с уменьшением отношения  $C/N$ . Экспериментальные данные были аппроксимированы автором метода линейным уравнением:

$$J_N = 122.5 - 7.82 \cdot \frac{C}{N}, \quad (7)$$

где  $J_N$  – поток азота из донных отложений,  $\text{мг м}^{-2} \text{сут}^{-1}$ .

Случаи применения этого метода, за исключением авторских экспериментов и расчетов, в литературе отсутствуют. Для подтверждения адекватности расчетов по уравнению весьма желательна верификация метода с использованием данных прямых измерений потоков азота.

Представляет некоторый интерес пример расчета потока фосфора из донных отложений рыбоводного пруда по эмпирической зависимости между внутренней и внешней нагрузкой, полученной М. В. Мартыновой [Власов, 2004]. Ориентировочность таких оценок очевидна, т. к. эта зависимость носит иллюстративный, а не расчетный характер.

#### *Расчет выноса биогенных веществ по имитационным гидроэкологическим моделям водоема*

Практически все современные модели экологических процессов в экосистемах водоемов при описании круговорота биогенных веществ содержат алгоритм расчета выноса моделируемой переменной (минеральные соединения биогенных веществ) из донных отложений. Применяемые формулы расчета потоков из донных отложений характеризуются большим разнообразием. Оценка коэффициентов формул проводится в процессе процедуры калибровки модели. Однако при надежной верификации модели появляется возможность модельного расчета как интегральной оценки интенсивности внутренней нагрузки, так и ее пространственно-временного распределения в водоеме. Многочисленные примеры расчета интенсивности потоков фосфора из донных отложений различных водоемов можно найти в работах А. В. Леонова, применяющего раз-

работанную им модель CNPSi для расчета гидроэкологического режима водоемов [Леонов, Пищальник, 2012]. Расчет многолетних изменений потоков фосфора из донных отложений водохранилища реализован в гидроэкологической модели ГМВ-МГУ на примере Можайского водохранилища [Гидроэкологический..., 2015]. Модельный подход следует считать наиболее перспективным направлением в исследовании роли внутренней нагрузки. Однако при известной сложности построения имитационных экологических моделей адекватность расчетов по ним в значительной степени зависит от надежности калибровки, верификации модели. Кроме того, успешность модельных расчетов связана с необходимостью накопления детальной информации о состоянии водоема, и в частности об обменных процессах на границе вода-дно.

*Оценка роли внутренней нагрузки в процессах эвтрофирования водохранилищ*

М. В. Мартыновой предложен метод оценки значимости внутренней нагрузки в экосистеме водоема. Главные факторы, контролирующие внутреннюю биогенную нагрузку водоемов: увеличение первичной продуктивности водоема и изменение кислородного режима [Мартынова, 2010].

Первый фактор приводит к нелинейному увеличению накопления органического вещества на дне, что проявляется в возрастании его содержания в донных отложениях и обогащении поровых растворов илов подвижными минеральными формами биогенных веществ при его деструкции. Второй фактор связан с резким возрастанием потоков фосфора из донных отложений при возникновении анаэробных условий и изменении окислительно-восстановительного потенциала среды. Совместное действие этих факторов обуславливает увеличение роли внутренней биогенной нагрузки при росте трофического состояния водоема в процессе эвтрофирования.

В качестве критериев значимости внутренней нагрузки в экосистеме водоема рассматривается показатель, основанный на сопоставлении потока соединений биогенных веществ со дна (с учетом времени водообмена) с запасом их в водной массе. Эта характеристика показывает относительный вклад биогенных веществ отложений в водную массу и рассчитывается по формуле:

$$\varphi = \frac{L \cdot S \cdot t}{M}, \quad (8)$$

где  $L$  – плотность потока биогенных элементов со дна, т км<sup>-2</sup> год;  $S$  – площадь дна водоема, км<sup>2</sup>;  $t$  – время водообмена, год;  $M$  – запас соединений элемента в водной массе, т.

Эту оценку следует рассматривать как приближенную из-за значительных колебаний запаса фосфора в водной массе в различные годы и невысокой точности расчета этой величины. Основная проблема при использовании метода состоит в сложности оценок параметров расчетной формулы.

В целом выбор метода оценки интенсивности внутренней биогенной нагрузки водоема определяется в первую очередь формулировкой цели и задач исследования и зависит от необходимой точности оценок. Достаточно высокая точность расчетов может быть достигнута экспериментальными методами, однако их применение сопряжено с необходимостью организации специальных полевых и лабораторных исследований. Балансовые методы перспективны при наличии детальной информации о водном объекте, которая может быть получена при реализации специальных программ мониторинга его экологического состояния.

## Литература

- Белкина Н. А. Ретроспективная оценка донных отложений Кондопожской губы Онежского озера // Водные ресурсы. 2005. Т. 32, № 6. С. 689–699.
- 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.
- Бреховских В. Ф., Гашкина Н. А., Ломова Д. В., Шакирова Е. Р. Влияние степени наполнения долинового водохранилища на интенсивность процессов, происходящих на границе раздела вода-донные отложения // Вод. ресурсы. 1999. Т. 26, № 1. С. 55–59.
- Власов Б. П. Антропогенная трансформация озер Беларуси: геоэкологическое состояние, изменение, прогноз. Минск: БГУ, 2004. 207 с.
- Гидроэкологический режим водохранилищ Подмосковья (наблюдения, диагноз, прогноз) / Ред. К. К. Эдельштейн. М.: Перо, 2015. 286 с.
- Даценко Ю. С. Балансовая оценка выноса фосфора из донных отложений Можайского водохранилища // Водные ресурсы. 1998. Т. 25(4). С. 507–509.
- Жидкова А. Ю., Гусакова Н. В. Оценка внутренней биогенной нагрузки на воды Таганрогского залива Азовского моря с позиции эвтрофирования // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы». 2017. Т. 4, № 4. 10 с.
- Жукова Т. В., Мартынова М. В., Жуков Э. П. Донные отложения в системе Нарочанских озер. 1. Внутренняя биогенная нагрузка // Водные ресурсы. 1990. № 2. С. 130–138.
- Игнатьева Н. В. Фосфор в донных отложениях и фосфорный обмен на границе вода-дно в Ладож-

ском озере: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 1997. 24 с.

Игнатьева Н. В. Роль донных отложений в круговороте фосфора в озерной экосистеме // Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее. СПб.: Наука, 2002. С. 148–156.

Игнатьева Н. В. Оценка потоков фосфора в пограничной зоне осадков – вода в Псковско-Чудском озере // Ученые записки РГМУ. 2014. № 34. С. 71–78.

Кузнецов С. И. Микрофлора озер и ее геохимическая деятельность. Л.: Наука, 1970. 318 с.

Леонов А. В., Пищальник В. М. Моделирование природных процессов в водной среде. Теоретические основы. Южно-Сахалинск: СахГУ, 2012. 227 с.

Лозовик П. А. Взаимодействие донных отложений северного Выгозера с водой // Органическое вещество и биогенные элементы в водах Карелии. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1985. С. 61–74.

Мартынова М. В. Донные отложения как источник азота и фосфора в водоеме. Обзор // Водные ресурсы. 1981. № 1. С. 164–182.

Мартынова М. В. Состояние и основные направления исследований обмена азотом и фосфором между донными отложениями и водой // Взаимодействие между седиментами в озерах и водохранилищах. Л.: Наука, 1984а. С. 139–146.

Мартынова М. В. Азот и фосфор в донных отложениях озер и водохранилищ. М.: Наука, 1984б. 159 с.

Мартынова М. В. Закономерности процессов накопления, трансформации и выделения со дна водоемов соединений азота и фосфора: Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Ростов-на-Дону, 1988. 47 с.

Мартынова М. В. Донные отложения как составляющая лимнических экосистем. М.: Наука, 2010. 242 с.

Мартынова М. В., Козлова Е. И. Фосфор в донных отложениях двух высокотрофных озер // Водные ресурсы. 1987. № 2. С. 103–112.

Мартынова М. В., Ломова Д. В., Кременецкая Е. Р. Роль Fe и Mn в циклах C, N, S, и P в морских и пресноводных отложениях. М.: ИПХФ РАН, 2017. 130 с.

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

Неверова-Дзюпак Е. В. Теоретическое, методологическое и инженерное обеспечение охраны поверхностных вод от антропогенного эвтрофирования: Дис. ... докт. техн. наук. СПб., 2003. 345 с.

Осмелкин Е. В. Закономерности осадконакопления в водоемах Чувашской республики: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Казань, 2018. 23 с.

Романенко В. И., Кузнецов С. И. Экология микроорганизмов пресных водоемов. Л.: Наука, 1974. 194 с.

Li W. C., Gregory S. Diffusion of ions in sea water and in deep sea sediments // Geochim. Cosmochim. Acta. 1974. Vol. 38. P. 703–714.

Nurnberg G. K. The prediction of internal phosphorus load in lakes with anoxic hypolimnia // Limnol. Oceanogr. 1984. Vol. 29. P. 111–124.

Perkins W. W., Welch E. B., Frodge J., Hubbard T. A zero degree of freedom total phosphorus model. 2. Application to Lake Sammamish, Washington // Lake Reserv. Manage. 1997. Vol. 13. P. 131–141.

Vollenwaider R. A. Input-output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology // Schweizerische Zeitschrift fur Hydrologie. 1975. Vol. 37. P. 53–84.

Welch E. B., Cooke G. D. Internal phosphorus loading in shallow lakes: Importance and control // Lake Reserv. Manage. 1996. Vol. 11. P. 273–281.

Поступила в редакцию 08.04.2019

## References

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

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

Brekhovskikh V. F., Gashkina N. A., Lomova D. V., Shakirova E. R. Vliyaniye stepeni napolneniya dolinnogo vodokhranilishcha na intensivnost' protsessov, proiskhodyashchikh na granitse razdela voda-donnyye otlozheniya [The influence of filling rate in the valley reservoir on the intensity of the processes at the water-bottom sediments border]. *Vodnye resursy* [Water Res.]. 1990. Vol. 26, no. 1. P. 55–59.

Datsenko Y. S. Balansovaya otsenka vynosa fosfora iz donnykh otlozhenii Mozhaiskogo vodokhranilishcha [Balance assessment of phosphorus removal from bot-

tom sediments of the Mozhaisk reservoir]. *Vodnye resursy* [Water Res.]. 1998. Vol. 25, no. 4. P. 507–509.

Gidroekologicheskii rezhim vodokhranilishch Podmoskov'ya [Hydrological regime of Moscow region reservoirs (observations, diagnostics, prediction)]. Moscow: Pero, 2015. 286 p.

Ignat'eva N. V. Fosfor v donnykh otlozheniyakh i fosfornyi obmen na granitse voda-dno v Ladozhskom ozere [Phosphorus in bottom sediments and phosphorus exchange at the water-bottom border in Lake Ladoga.]: Summary of PhD (Cand. of Geogr.) thesis. Limnology Inst. RAS. St. Petersburg, 1997. 24 p.

Ignat'eva N. V. Rol' donnykh otlozhenii v ozernoi ekosisteme [The role of bottom sediments in the phosphorus cycle in the lake ecosystem]. *Ladozhskoe ozero – proshloe, nastoyashchee i budushchee* [Lake Ladoga – past, present, and future]. St. Petersburg: Nauka, 2002. P. 148–156.

Ignat'eva N. V. Otsenka potokov fosfora v pogranichnoi zone osadok – voda v Pskovsko-Chudskom ozere [Estimation of phosphorus fluxes in the sediment – water boundary zone in Lake Peipsi]. *Uchenye zapiski RGGMU*

[Proceed. Russ. State Hydrometeorological Univ.]. 2014. No. 34. P. 71–78.

Kuznetsov S. I. Mikroflora ozer i ee geokhimicheskaya deyatel'nost' [Lake microflora and its geochemical activity]. Leningrad: Nauka, 1970. 318 p.

Leonov A. V., Pishchal'nik V. M. Modelirovanie prirodnykh protsessov v vodnoi srede. Teoreticheskie osnovy [Modeling of natural processes in the aquatic environment. Theoretical basis]. Yuzhno-Sakhalinsk: SakhGU, 2012. 227 p.

Lozovik P. A. Vzaimodeistvie donnykh otlozhenii severnogo Vygozera s vodoi [The interaction of the bottom sediments with water in northern Vygozero]. *Organicheskoe veshchestvo i biogennyye elementy v vodakh Karelii* [Organic matter and biogenic elements in the waters of Karelia]. Petrozavodsk, 1985. P. 61–74.

Martynova M. V. Donnye otlozheniya kak istochnik azota i fosfora v vodoeme. Obzor. [Bottom sediments as a source of nitrogen and phosphorus in the reservoir: an overview]. *Vodnye resursy* [Water Res.]. 1981. No. 1. P. 164–182.

Martynova M. V. Sostoyanie i osnovnye napravleniya issledovaniy obmena azotom i fosforom mezhdunymi otlozheniyami i vodoi [State and main areas of research on the exchange of nitrogen and phosphorus between bottom sediments and water]. *Vzaimodeistvie mezhdunymi otlozheniyami i vodoi* [Interaction between sediments in lakes and reservoirs]. Leningrad: Nauka, 1984a. P. 139–146.

Martynova M. V. Azot i fosfor v donnykh otlozheniyakh ozer i vodokhranilishch [Nitrogen and phosphorus in bottom sediments of lakes and reservoirs]. Moscow: Nauka, 1984b. 159 p.

Martynova M. V. Zakonomernosti protsessov nakopleniya, transformatsii i vydeleniya so dna vodoemov soedineniy azota i fosfora [Patterns of accumulation, transformation and excretion of nitrogen and phosphorus compounds from water bodies bottoms]: Summary of PhD (Dr. of Geogr.) thesis. Rostov-on-Don, 1988. 47 p.

Martynova M. V. Donnye otlozheniya kak sostavlyayushchaya limnicheskikh ekosistem [Bottom sediments as a component of limnic ecosystems]. Moscow: Nauka, 2010. 242 p.

Martynova M. V., Kozlova E. I. Fosfor v donnykh otlozheniyakh dvukh vysokotrofnykh ozer [Phosphorus in bottom sediments of two high-trophic lakes]. *Vodnye resursy* [Water Res.]. 1987. No. 2. P. 103–112.

Martynova M. V., Lomova D. V., Kremenetskaya E. R. Rol' Fe i Mn v tsiklakh C, N, S, i P v morskikh i presnovodnykh otlozheniyakh [The role of Fe and Mn in C, N, S, and P cycles in marine and freshwater sediments]. Moscow: IPKhF RAN, 2017. 130 p.

Mizandronev I. B. Khimicheskie protsessy v donnykh otlozheniyakh vodoemov [Chemical processes

in bottom sediments of water bodies]. Novosibirsk: Nauka, 1990. 176 p.

Neverova-Dziopak E. V. Teoreticheskoe, metodologicheskoe i inzhenernoe obespechenie okhrany po-verkhnostnykh vod ot antropogennogo evτροφirovaniya [Theoretical, methodological, and engineering support for protecting surface waters from anthropogenic eutrophication]: DSc (Dr. of Tech.) thesis. St. Petersburg, 2003. 345 p.

Osmelkin E. V. Zakonomernosti osadkonakopleniya v vodoemakh Chuvashskoi respubliki [Patterns of sedimentation in the reservoirs of the Chuvash Republic]: Summary of PhD (Cand. of Geogr.) thesis. Kazan', 2018. 23 p.

Romanenko V. I., Kuznetsov S. I. Ekologiya mikroorganizmov presnykh vodoemov [Ecology of freshwater microorganisms]. Leningrad: Nauka, 1974. 194 p.

Vlasov B. P. Antropogennaya transformatsiya ozer Belarusi – geoekologicheskoe sostoyanie, izmenenie, prognoz [Anthropogenic transformation of the lakes of Belarus: geoecological state, changes, forecast]. Minsk: BGU, 2004. 207 p.

Zhidkova A. Y., Gusakova N. V. Otsenka vnutrennei biogennoi nagruzki na vody Taganrogskogo zaliva Azovskogo morya s pozitsii evτροφirovaniya [Assessment of the internal nutrient load on the waters of the Taganrog Bay of the Sea of Azov in view of eutrophication]. *Internet-zhurn. «Otkhody i resursy»* [Russ. J. Res., Conservation, and Recycling]. 2017. Vol. 4, no. 4. 10 p.

Zhukova T. V., Martynova M. V., Zhukov E. P. Donnye otlozheniya v sisteme Narochanskikh ozer. 1. Vnutrennyaya biogennaya nagruzka [Bottom sediments in the system of the Naroch lakes. 1. Internal nutrient load.]. *Vodnye resursy* [Water Res.]. 1990. No. 2. P. 130–138.

Li W. C., Gregory S. Diffusion of ions in sea water and in deep sea sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1974. Vol. 38. P. 703–714.

Nurnberg G. K. The prediction of internal phosphorus load in lakes with anoxic hypolimnia. *Limnol. Oceanogr.* 1984. Vol. 29. P. 111–124.

Perkins W. W., Welch E. B., Frodge J., Hubbard T. A zero degree of freedom total phosphorus model. 2. Application to Lake Sammamish, Washington. *Lake Reserv. Manage.* 1997. Vol. 13. P. 131–141.

Vollenwaider R. A. Input-output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology. *Schweizerische Zeitschrift fur Hydrologie*. 1975. Vol. 37. P. 53–84.

Welch E. B., Cooke G. D. Internal phosphorus loading in shallow lakes: Importance and control. *Lake Reserv. Manage.* 1996. Vol. 11. P. 273–281.

Received April 08, 2019

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:**

**Даценко Юрий Сергеевич**  
профессор каф. гидрологии суши географического  
факультета, д. г. н.  
Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова  
Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991  
эл. почта: yuri0548@mail.ru  
тел.: (495) 9395470

**CONTRIBUTOR:**

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

УДК 551.46.06 + 528.8.04

## SATELLITE EVIDENCE FOR ENHANCEMENT OF THE COLUMN MIXING RATIO OF ATMOSPHERIC CO<sub>2</sub> OVER *E. HUXLEYI* BLOOMS

D. V. Kondrik<sup>1</sup>, E. E. Kazakov<sup>1</sup>, D. V. Pozdnyakov<sup>1</sup>, O. M. Johannessen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Nansen Scientific Society, Bergen, Norway

*Emiliana huxleyi* algae are known to enhance CO<sub>2</sub> partial pressure in their ambient water, ( $p\text{CO}_2$ )<sub>w</sub>. Thus, over such bloom areas, the atmospheric column-averaged dry air mole fraction of carbon dioxide (XCO<sub>2</sub>) is likely to increase, which has not yet been quantified on basin scales. Here we report on an Orbiting Carbon Observatory (OCO-2) satellite study of the influence of *E. huxleyi* blooms on XCO<sub>2</sub> over the Black Sea. We established that concurrently with a significant ( $p\text{CO}_2$ )<sub>w</sub> rise, there was an increase in the overlying XCO<sub>2</sub> within the range ~1 to nearly 2 ppmv, which is commensurate with the planetary annual increase of XCO<sub>2</sub>. As we found, ( $\Delta p\text{CO}_2$ )<sub>w</sub> in the Black Sea and Subpolar and Polar seas are closely comparable. This strongly indicates that *E. huxleyi* blooms do weaken carbon sinks in the ocean on a large scale, which can be consequential for global climatology and marine biogeochemistry.

**Key words:** Black Sea; blooms of *Emiliana huxleyi*; CO<sub>2</sub> partial pressure in water; satellite remote sensing; OCO-2 data; enhancement of atmospheric columnar CO<sub>2</sub> content over *E. huxleyi* blooms.

### Д. В. Кондрик, Э. Э. Казаков, Д. В. Поздняков, О. М. Йоханнессен. СПУТНИКОВОЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВО УВЕЛИЧЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ СО<sub>2</sub> В АТМОСФЕРНОМ СТОЛБЕ НАД ОБЛАСТЬЮ ЦВЕТЕНИЯ *E. HUXLEYI*

Известно, что водоросли *Emiliana huxleyi* повышают парциальное давление СО<sub>2</sub> в окружающей их воде, ( $p\text{CO}_2$ )<sub>w</sub>. Таким образом, над областями цветения может увеличиваться средняя по атмосферному столбу молярная доля диоксида углерода (XCO<sub>2</sub>) сухого воздуха. Значения (XCO<sub>2</sub>) количественно еще не определялись в масштабах бассейна. Здесь мы сообщаем о спутниковом исследовании влияния цветений *E. huxleyi* на значения XCO<sub>2</sub> над Черным морем, основанном на данных Orbiting Carbon Observatory (OCO-2). Установлено, что одновременно со значительным увеличением ( $p\text{CO}_2$ )<sub>w</sub> в атмосферном столбе над цветением наблюдается увеличение XCO<sub>2</sub> в диапазоне от ~ 1 до почти 2 ppmv, что по величине сравнимо с планетарным годовым увеличением XCO<sub>2</sub>. Показано, что значения ( $p\text{CO}_2$ )<sub>w</sub> в Черном море и в субполярных и полярных морях тесно сопоставимы. Это убедительно свидетельствует о том, что цветения *E. huxleyi* в значительной степени ослабляют способность океана поглощать углерод на значительных протяженностях, и это может иметь значение для глобальной климатологии и морской биогеохимии.

**Ключевые слова:** Черное море; цветения *Emiliana huxleyi*; парциальное давление СО<sub>2</sub> в воде; спутниковое дистанционное зондирование; данные OCO-2; возрастание содержания СО<sub>2</sub> в атмосферном столбе над цветениями *Emiliana huxleyi*.

## Introduction

Phytoplankton blooms of *Emiliania huxleyi* are known to produce  $\text{CO}_2$ , causing less uptake of atmospheric  $\text{CO}_2$  by the ocean. A recent study based on 18 years (1998–2015) of quantitative satellite observations of  $\text{CO}_2$  partial pressure in surface waters,  $(p\text{CO}_2)_w$ , of five seas in the North Atlantic, Arctic and North Pacific, revealed that within the areas of *E. huxleyi* blooms, the increment in  $p\text{CO}_2$ ,  $(\Delta p\text{CO}_2)_w$ , was significant, constituting tens to hundreds of microatmospheres [Kondrik et al., 2018; the respective database and its description can be found in Kondrik et al., 2019].

When normalized to  $\text{CO}_2$  partial pressure in the absence of blooms (“background”  $p\text{CO}_2$  in water –  $(p\text{CO}_2)_{wb}$ ), the mean and maximum  $(\Delta p\text{CO}_2)_w$  values proved to be in the range 20.4–44.2 and 31.6–62.5 %, respectively. The bloom areas in the target seas varied significantly among the years with maximum values in the range of several tens to several hundreds of square kilometres [Kondrik et al., 2017].

The aforementioned *E. huxleyi* bloom-driven enhancement of dissolved  $\text{CO}_2$  partial pressure can reduce, nullify or even reverse the flux of  $\text{CO}_2$  at the atmosphere-ocean interface. Indeed, Shutler et al. [2013] report on an average reduction in the monthly air-sea  $\text{CO}_2$  flux by about 55 % across the marine tracts encompassing extensive *E. huxleyi* blooms in the North Atlantic, whereas the maximum reduction over the time period 1998–2007 was registered at 155 %.

In the southern hemisphere *E. huxleyi* blooms are also vast: e. g., the area of the gigantic Great Calcite Belt extending from  $\sim 38$  to  $\sim 60$  °S is reportedly in excess of 50 million square kilometres [Balch et al., 2016].

Given these estimations, it is reasonable to expect that at least within the areas of *E. huxleyi* blooms, the  $\text{CO}_2$  balance between the atmosphere and the ocean can shift, causing a considerable reduction in the  $\text{CO}_2$  flux from atmosphere to ocean and even its reversal.

Due to the global nature of the phenomenon of *E. huxleyi* blooms [Brown, Yoder, 1994; Iglesias-Rodriguez et al., 2002; Moore et al., 2012], this can have appreciable ramifications, among which are a reduction in the world’s ocean carbon sink and a consequential enhancement of global warming [IPCC, 2014].

However, until recently, numerical assessments of the impact of *E. huxleyi* blooms on  $\text{CO}_2$  exchange between atmosphere and ocean were confined to isolated shipborne *in situ* measurements [e. g. Robertson et al., 1994], and as such could not be considered representative because of data

paucity. With the launch of the Orbiting Carbon Observatory 2 (OCO-2) satellite mission [Crisp, 2015] in 2014 such studies became feasible: the column-averaged dry air mole fraction of carbon dioxide ( $\text{XCO}_2$ ) retrieved by OCO-2 can be obtained over the target bloom of *E. huxleyi* in order to detect the  $\text{XCO}_2$  enhancement in the atmosphere.

Here we report on the results of our satellite study of the Black Sea, as a test example. The reason for this selection is twofold: firstly, the Black Sea is an area of intense *E. huxleyi* blooms [Cokacar et al., 2001], and secondly, such intense blooms occur there annually, in contrast to other seas [Smyth et al., 2004; Oguz, Merico, 2006]. At the maximum of their development (e. g. in 2012), the blooms cover areas as large as  $\sim 354 \times 10^3 \text{ km}^2$ , thus accounting for  $\sim 84$  % of the entire surface of the sea.

## Materials and Methods

To implement the present study, spatially and temporally collocated data on two remotely-sensed variables are required, viz. on spectral remote sensing reflectance,  $R_{rs}$  ( $\text{sr}^{-1}$ ) and  $\text{XCO}_2$  (ppmv). These data are from, respectively, OC CCI (in six channels centred at 412, 443, 490, 510, 555 and 670 nm, at 4 km spatial and 8 day temporal resolution, <http://www.esa-oceancolour-cci.org>) and OCO-2 (OCO-2 Level 2 bias-corrected  $\text{XCO}_2$  product at 3  $\text{km}^2$  spatial resolution, NASA Data Archive Page <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?project=OCO>).

The period of satellite observations covers two years (2015–2016), when both Ocean Colour Climate Change Initiative (OC CCI) and OCO-2 data were available. Although also available for 2017 and 2018, OCO-2 data could not be used as they proved to be deficient due to either extensive cloud masking or heavy flagging (the prevailing amount of data points contained low-quality flags) over the areas encompassing OCO-2 footprint trajectories within *E. huxleyi* blooms in the Black Sea.

The work was performed in the following major sequential steps: (1) identification and precise delineation/quantification of an *E. huxleyi* bloom area, (2) quantification of the enhancement of  $\text{CO}_2$  partial pressure in surface water,  $(\Delta p\text{CO}_2)_w$  ( $\mu\text{atm}$ ) within the bloom area, (3) identification of  $\text{XCO}_2$  (ppmv) data availability on the target marine areas, (4) establishment of  $\text{XCO}_2$  variations over the target area, and (5) quantification of increments in  $\text{XCO}_2$ ,  $\Delta\text{XCO}_2$  during the bloom period against the respective  $\text{XCO}_2$  background values.

The methodologies of fulfilling steps 1 and 2 are described in detail in our previous papers [Kondrik et al., 2017, 2018]. Here only their brief descriptions are given.

In step 1, spectra of  $R_{rs}$  from the turquoise areas produced by *E. huxleyi* algae were automatically analyzed to select those complying with the pre-selected thresholds and the location of maxima for this variable at the OC CCI wavelengths in the visible. Summation of the pixels thus identified gave the bloom area.

In step 2, values of  $\text{CO}_2$  partial pressure in surface waters,  $(\Delta p\text{CO}_2)_w$  within the bloom area were obtained making use of the algorithm developed in [Kondrik et al., 2018]. The algorithm is based on the regression dependency between the values of  $R_{rs}$  (490 nm) and  $(\Delta p\text{CO}_2)_w$ , which has been confidently established with the root mean square error of  $\pm 23.4 \mu\text{atm}$  on the basis of more than 2500 data points located throughout the subarctic and arctic seas.

In step 3,  $\text{XCO}_2$  data from OCO-2 were selected that conformed to a single-sounding random error between 0.5 and 1 ppmv [Crisp, 2015] and respective quality control flags.

Step 4. Some  $\text{XCO}_2$  values were not available for each 8-day intervals of observations because of either cloud filtering or OCO-2 data flagging/unreliable quality. To fill such gaps in the sequence of  $\text{XCO}_2$  values, i. e. the missing segments of the  $\text{XCO}_2$  intraannual variations, a linear interpolation approach was employed. Further, the sequence of  $\text{XCO}_2$  values was subjected to a polynomial approximation of order 7.

This approach was applied separately to both (i) all data over the entire two-year term (i. e. 2015–2016), including the periods of *E. huxleyi* blooming, and (ii) to the data registered each year but excluding the *E. huxleyi* blooming period per se plus one week before and after the blooming.

The difference  $\Delta\text{XCO}_2$  between the *actually recorded*  $\text{XCO}_2$  values and the respective *approximated*  $\text{XCO}_2$  values beyond the *E. huxleyi* blooming period reflects for the excess of  $\text{XCO}_2$  over the bloom area.

In step 5,  $\Delta\text{XCO}_2$  values were quantified and their temporal variability was analyzed.

## Results

Our quantitative assessments of the *E. huxleyi* bloom extent in the target sea indicate that we are dealing with a huge phenomenon. Indeed, as Figure 1, a illustrates, both in 2015 and 2016 the bloom areas at the stage of maximum development reached 177.0–205.3 thousand square kilometers, which corresponds to 41.9–48.6 %, i. e. almost half of the entire surface of the Black Sea with depths in excess of 200 m (e. g. [Özsoy, Ünlüata, 1997], see also Figure 2, a).

Importantly, for the periods of blooming in 2015 and 2016, the concurrent OCO-2 daily data are in most cases amply available with only rare exceptions (black bars in Figure 1, a).

The obtained data reveal enhanced values of  $\text{XCO}_2$  over the bloom areas. The magnitude of  $\text{XCO}_2$  increment for both years proved to be significant: the maximum increments of  $\text{XCO}_2$  are close to 2 ppmv (Fig. 1, c), which constitutes  $\sim 0.5\%$  of the present mean  $p\text{CO}_2$  in the atmosphere [Dlugokencky, 2016] or is on the same order of magnitude as the annual increase. Given that (i) the single-sounding random errors are between 0.5 and 1 ppmv [Crisp, 2015] and (ii) the number of OCO-2 observations in our case is up to 400 (Fig. 1, a), the increments established in this study should generally be considered as reliable. An independent confirmation of validity of this statement can be found e. g. in [Wu et al., 2018].

However, there was one case on 24.05.2016 when the  $\text{XCO}_2$  increment value was highly negative, about  $\sim 1.5$  ppmv, i. e. beyond the stated error of a single sounding, 0.5–1.0 ppmv. This case corresponds to the situation when the number of return signals was at least ten times less than that registered in other measurements during the period of high bloom intensity (compare Fig. 1, a and c), and hence the respective retrievals were insufficiently reliable. This case is illustrated in Figure 2, a: for 24.05.2016 the number of red points (reflecting the OCO-2 footprints) in the marginal eastern part of the sea is far less than for e. g., 16.05.2016 (Fig. 2, b) – the date of concurrently high values of  $\max(\Delta p\text{CO}_2)_w$  in surface water and the number of satellite observations and strongly positive  $\text{XCO}_2$  increment. The same arguments refer to a few cases in 2015 (Fig. 1, c), when the resultant  $\Delta\text{XCO}_2$  values, although very small, were non-positive.

As the Black Sea is essentially a landlocked waterbody, the influence of watershed-based  $\text{CO}_2$  sources (both of rural and industrial/urban origin) can affect  $\text{XCO}_2$  readings through the transport of polluted atmospheric air over the *E. huxleyi* blooms. A good clarification of this issue could be the situation when satellite footprints passed through both the bloom and bloom-free areas during one and same overflight. Because of the paucity of high quality OCO-2 data during 2015–2016 on the Black Sea (no clouds, no heavy data flagging) such situations were found solely on two occasions, viz. on 02.06.2015 and 16.05.2016 (Fig. 3 and 2, b, respectively). The mean  $\text{XCO}_2$  values (in ppmv) over the long footprint passing through the area of *E. huxleyi* bloom, and two footprint segments intersecting the bloom-free area (both are encircled in Fig. 3)

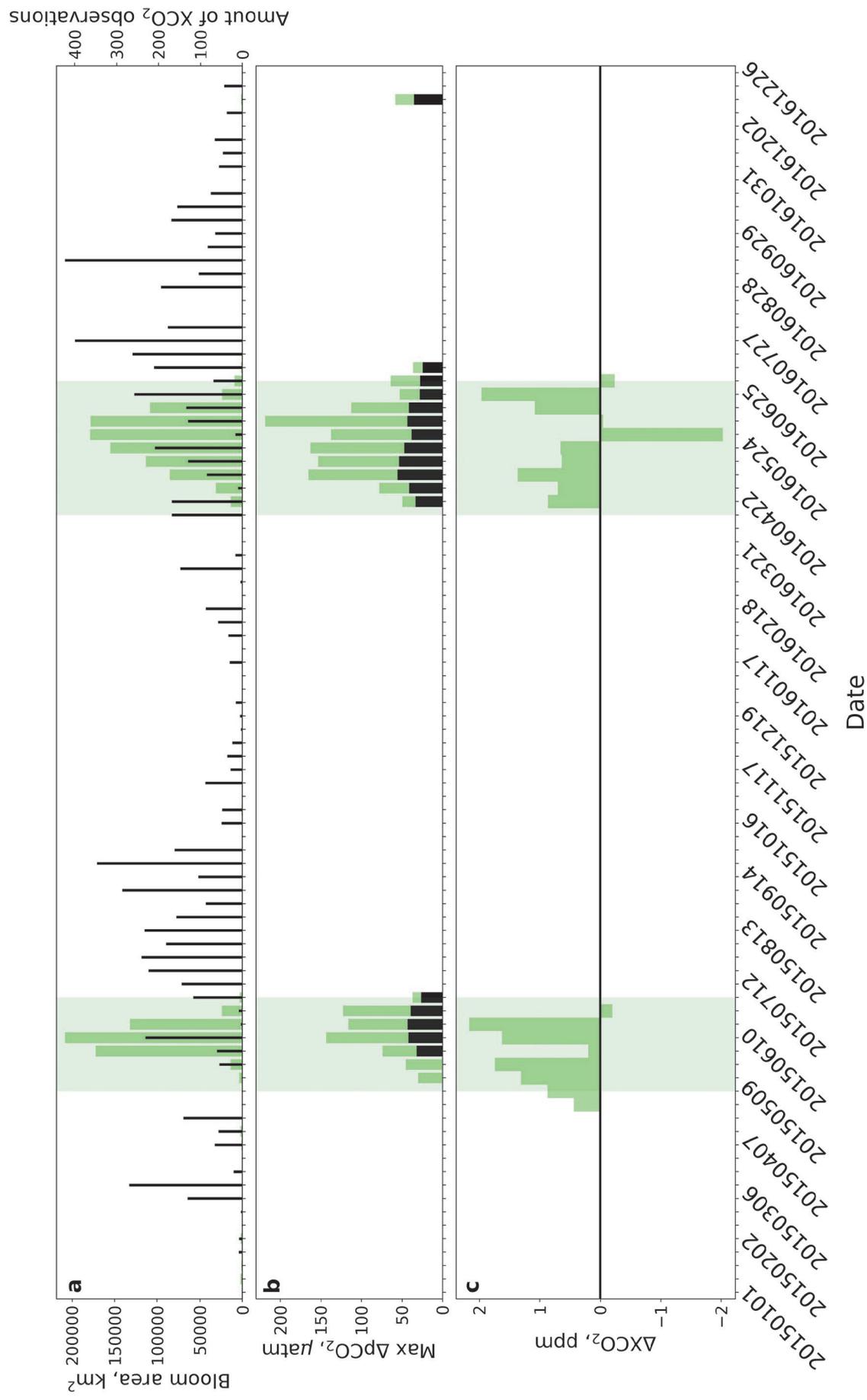


Fig. 1. The phenomenon and effects of *E. huxleyi* blooms in the Black Sea in 2015 and 2016 as observed and characterized from satellite sensors. Panel a: (i) bloom area (green bars), and (ii) number of XCO<sub>2</sub> observations (black bars); panel b:  $(\Delta p\text{CO}_2)_w$  maximal values in water within the bloom area (green bars); panel c: XCO<sub>2</sub> increments over the bloom areas. The pale green columns in panels a-c reflect the period of blooming

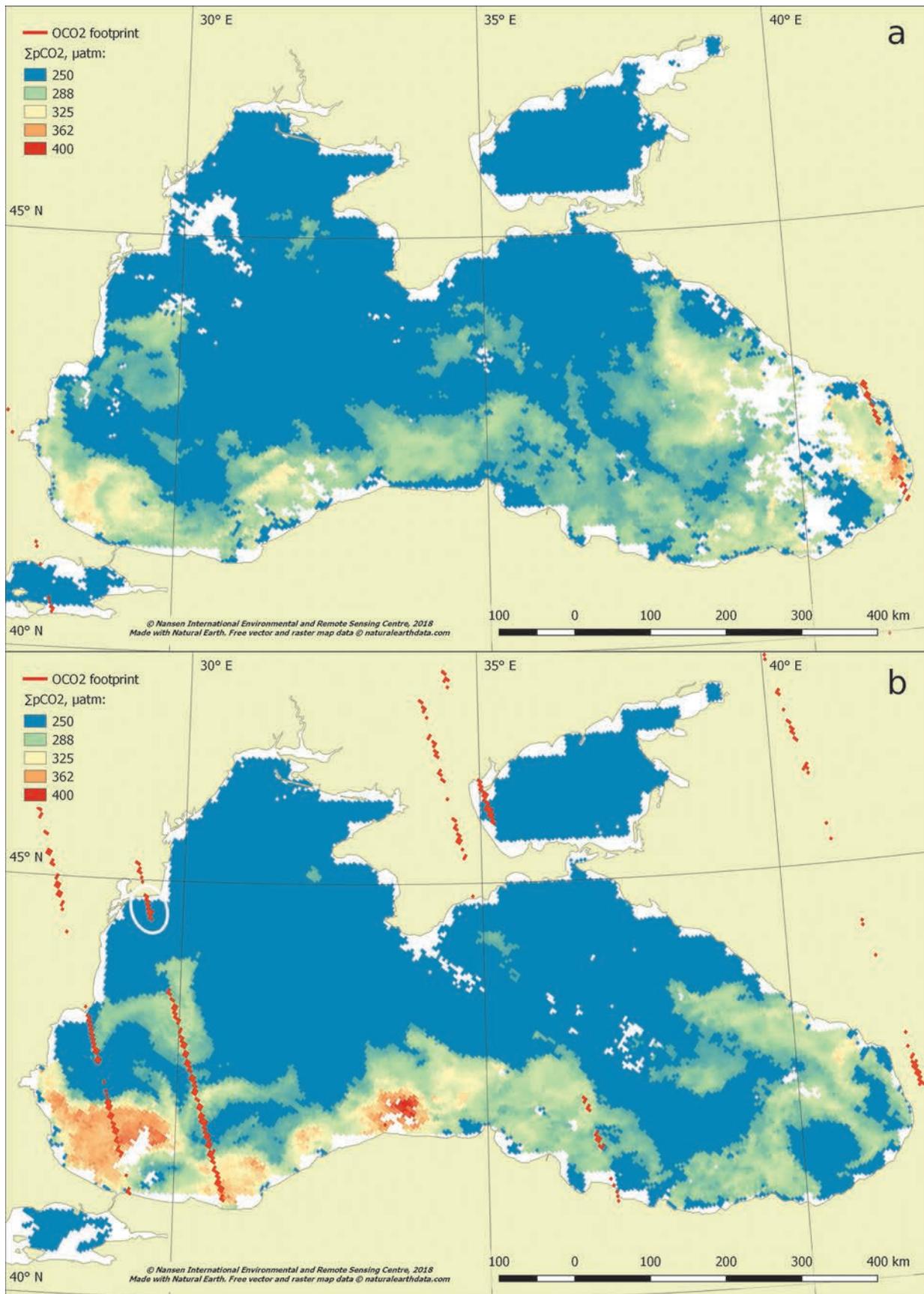


Fig. 2. Spatial distribution of CO<sub>2</sub> partial pressure increment, ( $\Delta p\text{CO}_2$ )<sub>w</sub>, in the Black Sea surface water as retrieved from OC CCI data on a) 24.05.2016 and b) 16.05.2016. Red lines are the locations of the OCO-2 footprints across the *E. huxleyi* bloom on each of the two dates. The encircled area is explained in the text

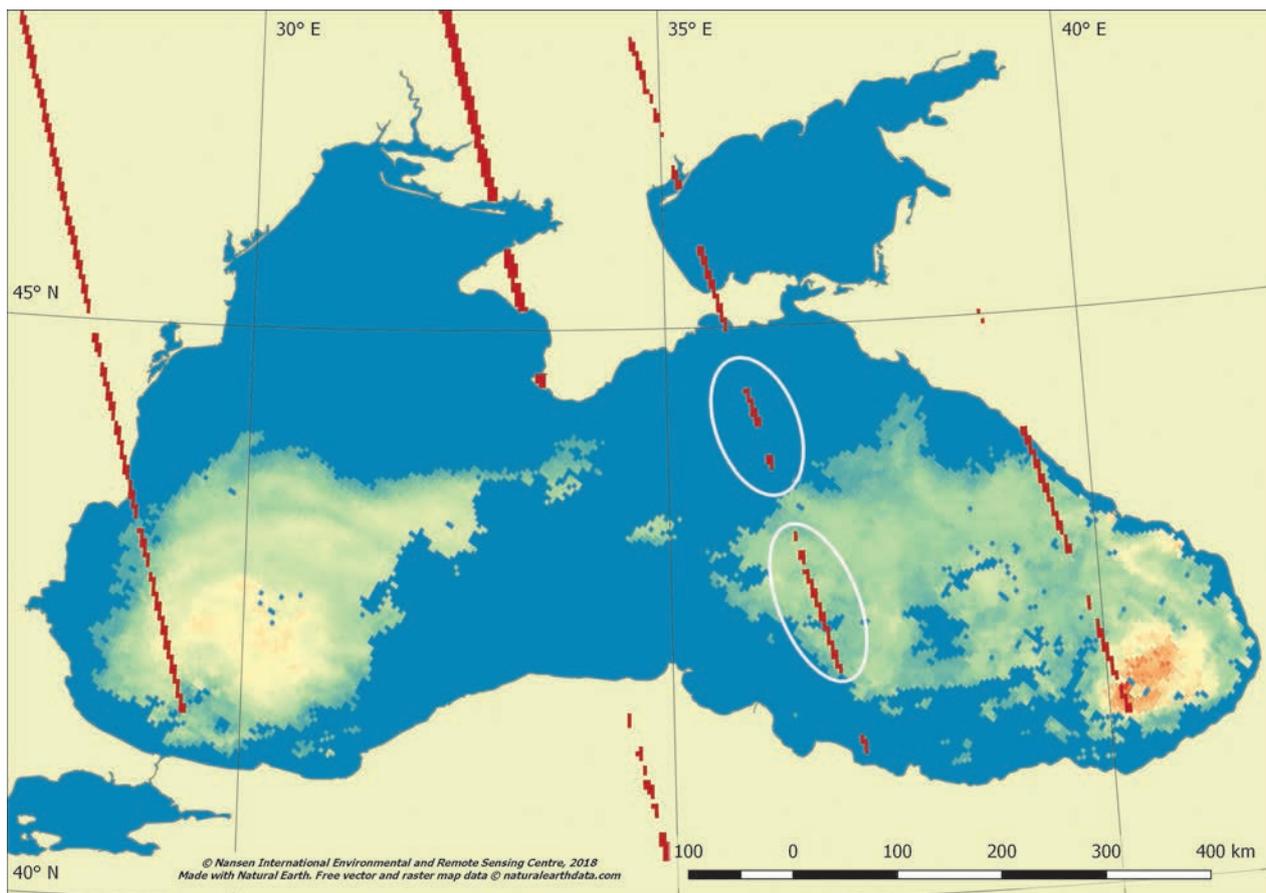


Fig. 3. Spatial distribution of CO<sub>2</sub> partial pressure increment,  $(\Delta p\text{CO}_2)_w$ , in the Black Sea surface water as retrieved from OC CCI data on 02.06.2015.

Red lines designate the OCO-2 footprints across the sea. The encircled areas are explained in the text

were, respectively, 400.07 and 399.2. Thus, these data indicate that there was no significant influence exerted by CO<sub>2</sub> atmospheric advection from the watershed. The same conclusion can be drawn from the second example: on 16.05.2015 the mean XCO<sub>2</sub> values (in ppmv) along the footprint extending over the south-western region of the Black Sea, and along a short part of it (encircled in Fig. 2, b) in the close vicinity of the coast were, respectively, 403.5 and 401.75. Should there be any CO<sub>2</sub> atmospheric advection from the watershed, the proportion between these two numbers would be essentially different. Both results should not be considered as incidental. Indeed, all available XCO<sub>2</sub> data registered along the footprints (which passed through different parts of the sea) were used collectively, and on this basis common statistical characteristics were calculated. In other words, there was no specific reference to a concrete point in the footprint, but a general aggregation of spatio-temporal variability in XCO<sub>2</sub> was established. Had there been an impact of CO<sub>2</sub> advection, it would have been reflected in the entire set of XCO<sub>2</sub> determined along the footprint.

Finally, as mentioned above, on some occasions in 2015 and 2016  $\Delta\text{XCO}_2$  values are negative (Fig. 1, plate c). Although we assume that the negative  $\Delta\text{XCO}_2$  values are not reliable because they were retrieved from a small number of OCO-2 return signals, nevertheless, they can arguably be interpreted as an explicit indication of the absence of advected CO<sub>2</sub> from the marine watershed in those parts of the sea.

Excluding the unreliable data discussed immediately above leads to a value of the mean XCO<sub>2</sub> increment over the blooming period close to 1 ppmv. Given that this assessment is based on a statistically significant number of measurements (Fig. 1, a), it should be assumed as reliable, and hence the trustworthy range of XCO<sub>2</sub> increments over the Black Sea extends from 1 ppmv to the maximum observed value close to 2 ppmv (Fig. 1, c).

As our  $\Delta p\text{CO}_2$  retrieval algorithm was developed and verified for high latitude marine environments, the appropriateness of its application to the conditions of the Black Sea needed confirmation. To the best of our knowledge, there are no

Temporal pattern of CO<sub>2</sub> partial pressure excess (in percent) within *E. huxleyi* blooms in surface waters of the target seas over the period of spaceborne observations (1998–2016)

Year	<b>A</b>					
	North Sea (750)*	Norwegian Sea (1383)	Greenland Sea (1205)	Barents Sea (1400)	Bering Sea (2292)	Black Sea (436)
1998	31.8 (9.6 ; 0.4)**	35.6 (67.0; 12.2)	– (2.8; 0.2)	40.6 (118.4; 8.1)	62.3 (220.2; 8.9)	21.7 (74.2; 17.6)
1999	43.1 (28.1; 1.2)	28.8 (65.1; 11.9)	20.0 (17.2; 1.4)	42.5 (186.1; 12.8)	54.3 (201.2; 8.1)	25.8 (13.8; 3.3)
2000	35.4 (58.9; 2.5)	24.6 (59.6; 10.9)	– (1.2; 0.1)	34.5 (178.0; 12.2)	53.7 (247.3; 10.0)	35.8 (104.9; 24.8)
2001	27.7 (43.9; 1.9)	26.3 (36.7; 6.7)	21.1 (5.8; 0.5)	62.5 (269.4; 18.5)	19.2 (209.0; 8.4)	12.8 (1.7; 0.4)
2002	23.9 (76.4; 3.2)	15.6 (36.4; 6.7)	31.0 (5.2; 0.4)	39.2 (248.0; 17.0)	17.0 (5.5; 0.2)	36.7 (345.2; 81.8)
2003	38.1 (72.6; 3.1)	39.1 (105.4; 19.3)	– (4.8; 0.4)	50.6 (201.9; 13.8)	22.0 (27.0; 1.1)	11.8 (20.1; 4.8)
2004	27.9 (24.8; 1.0)	20.8 (30.7; 5.6)	12.5 (10.0; 0.8)	41.0 (234.0; 16.0)	20.0 (22.3; 0.9)	17.0 (206.4; 48.9)
2005	30.1 (83.2; 3.5)	17.6 (46.3; 8.5)	23.5 (20.9; 1.7)	27.5 (120.4; 8.3)	16.0 (22.3; 0.9)	20.3 (198.3; 47.0)
2006	24.1 (10.8; 0.5)	46.9 (65.6; 12.0)	12.4 (10.4; 0.8)	30.9 (167.9; 11.5)	19.8 (8.9; 0.4)	37.0 (344.9; 81.7)
2007	21.2 (21.8; 0.9)	11.8 (25.5; 4.7)	– (7.1; 0.6)	47.3 (218.6; 15.0)	25.5 (63.6; 2.6)	14.1 (277.1; 65.6)
2008	41.1 (54.7; 2.3)	17.5 (19.1; 3.5)	31.6 (48.2; 3.8)	37.4 (156.3; 10.7)	15.4 (12.0; 0.5)	31.4 (320.7; 76.0)
2009	18.4 (74.9; 3.2)	27.8 (26.0; 4.8)	– (7.4; 0.6)	27.6 (129.9; 8.9)	28.1 (46.8; 1.9)	11.0 (68.5; 16.2)
2010	45.6 (145.3; 6.1)	29.7 (109.2; 20.0)	23.5 (43.2; 3.4)	21.2 (116.2; 8.0)	– (4.2; 0.2)	10.2 (118.1; 28.0)
2011	40.8 (106.3; 4.5)	45.4 (51.8; 9.5)	– (4.7; 0.4)	55.1 (267.7; 18.4)	43.8 (47.6; 1.9)	10.2 (292.2; 69.2)
2012	28.0 (55.5; 2.3)	16.2 (11.6; 2.1)	16.1 (18.8; 1.5)	58.7 (371.5; 25.5)	24.6 (1.5; 0.1)	58.6 (353.8; 83.8)
2013	25.5 (31.8; 1.3)	26.3 (27.3; 5.0)	20.2 (16.1; 1.3)	60.5 (246.8; 16.9)	14.1 (5.3; 0.2)	16.8 (121.6; 28.8)
2014	32.6 (55.1; 2.3)	26.4 (29.2; 5.3)	18.8 (53.6; 4.3)	56.5 (169.1; 11.6)	47.2 (102.4; 4.1)	10.9 (170.2; 40.3)
2015	49.0 (54.5; 2.3)	14.6 (69.9; 12.8)	– (5.5; 0.4)	46.4 (289.6; 19.9)	40.3 (13.4; 0.5)	13.9 (205.3; 48.6)
2016	41.9 (10.3; 0.4)	34.8 (63.4; 11.6)	14.5 (8.1; 0.6)	59.6 (387.6; 26.6)	37.9 (56.3; 2.3)	23.0 (177.0; 41.9)
<b>B</b>	<b>33.0 (53.6; 2.3)</b>	<b>26.6 (49.8; 9.1)</b>	<b>20.4 (15.3; 1.2)</b>	<b>44.2 (214.6; 14.7)</b>	<b>31.2 (69.3; 2.8)</b>	<b>22.0 (179.7; 42.6)</b>
<b>C</b>	<b>49.0 (145.3; 6.1)</b>	<b>46.9 (109.2; 20.0)</b>	<b>31.6 (53.6; 4.3)</b>	<b>62.5 (387.6; 26.6)</b>	<b>62.3 (247.3; 10.0)</b>	<b>58.6 (353.8; 83.8)</b>

Note. **A**:  $[(\Delta p\text{CO}_2)_w / (p\text{CO}_2)_{wb}] \cdot 100\%$  maximum values as determined within *E. huxleyi* blooms in the target seas for each year of satellite observations. **B** and **C**: mean and maximum values of the above ratio over the period of observations. \* The number in parenthesis is the area (in  $10^3 \text{ km}^2$ ) of each sea. \*\* The first and second numbers in parenthesis in each column are, respectively, the maximum bloom area ( $10^3 \text{ km}^2$ ) and its ratio to the sea area (in percent).

published reports on  $\Delta p\text{CO}_2$  in surface water due to *E. huxleyi* blooming in the Black Sea. However, we found that our results obtained on the CO<sub>2</sub> partial pressure within the bloom in the Black Sea proved to be closely in line with the set of multi-year in situ measurements of this variable within an *E. huxleyi* bloom persistently appearing at one and the same station in the area of typical but not most intense blooms of *E. huxleyi* in the Black Sea (south-east off the Crimea) during late May–July in 2009, 2010 and 2013 [Khoruzhiy et al., 2010; Konovalov et al., 2014]. Indeed, the in situ measurements have shown that  $p\text{CO}_2$  values were well within the ranges reported by us. Thus, in 2013  $p\text{CO}_2$  levels in the surface waters varied within 420–530  $\mu\text{atm}$ . Through a comparison of these data with those in our Table and assumption that  $\Delta p\text{CO}_2$  averaged over both the sea and the period of bloom observations in 2015–2016 is 100–120  $\mu\text{atm}$  (Fig. 1, b) it can be drawn that our data on  $p\text{CO}_2$  are within the range 405–554  $\mu\text{atm}$ . Noting that these numbers refer to the entire bloom area in the Black Sea, the correspondence is close

enough and therefore justifies the application of our  $\Delta p\text{CO}_2$  retrieval algorithm to the Black Sea case.

Thus, the blooming-driven enhancement of atmospheric CO<sub>2</sub> partial pressure over the Black Sea is shown to be caused by the increase in CO<sub>2</sub> partial pressure in water,  $(\Delta p\text{CO}_2)_w$ , whose maximum was in the range 125–150  $\mu\text{atm}$  (Fig. 1, b). This corresponds to 44.7–65.8 % of the bloom-driven increase in CO<sub>2</sub> partial pressure in water, assessed as  $(\Delta p\text{CO}_2)_w$  normalized to CO<sub>2</sub> partial pressure in water in the absence of blooming  $(p\text{CO}_2)_{wb}$ .

## Discussion

Importantly, these results for both  $(\Delta p\text{CO}_2)_w$  and normalized ratio  $(\Delta p\text{CO}_2)_w / (p\text{CO}_2)_{wb}$  are quite comparable with the respective values registered in blooming surface waters of the polar Barents Sea, as well as in some subpolar marine environments, such as the North, Norwegian, Greenland and Bering Seas [Kondrik et al., 2018] – see Table and Figure 4. Hence, a similar blooming-driven

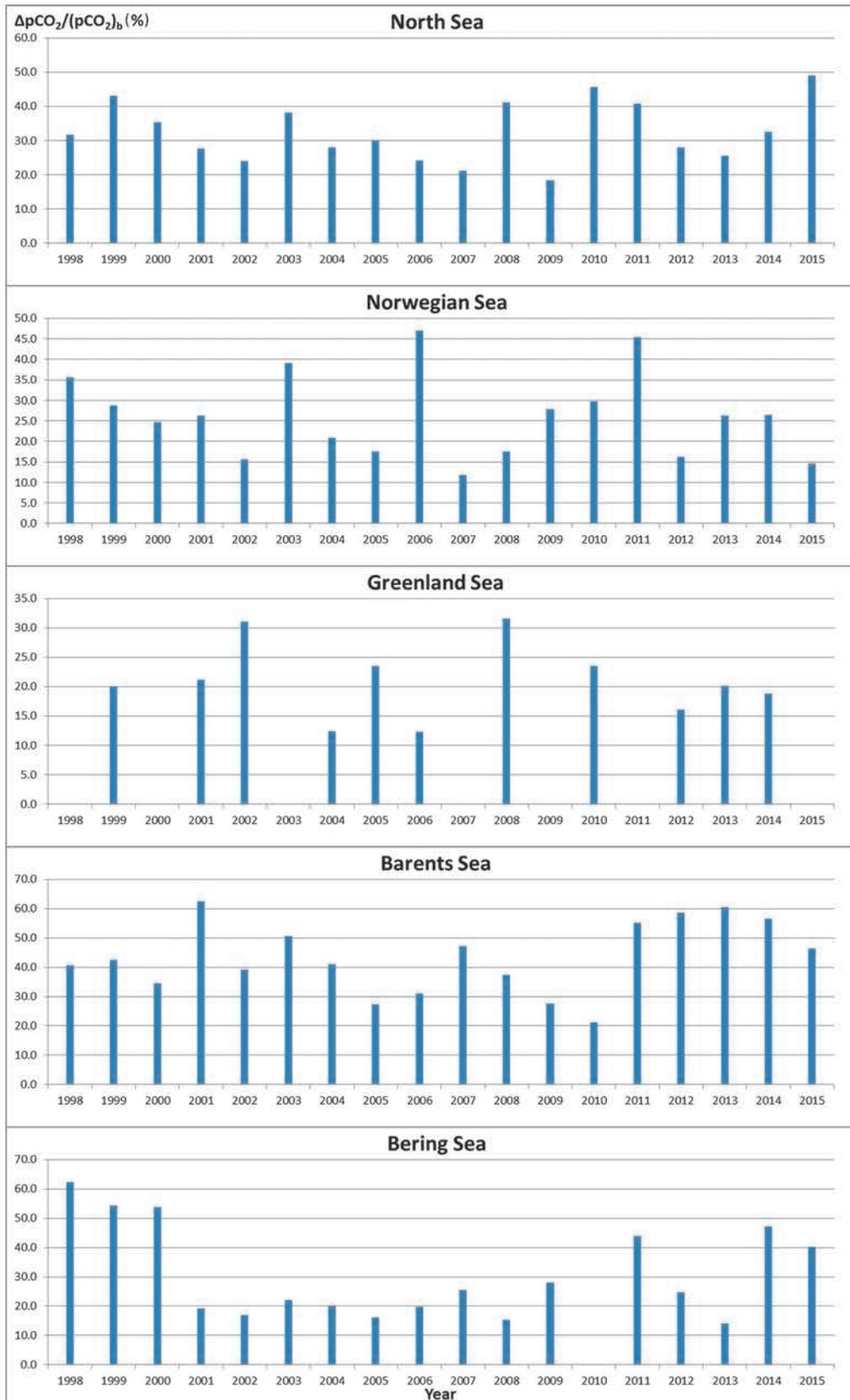


Fig. 4. Spatial and temporal variations in  $[(\Delta p\text{CO}_2)_w / (p\text{CO}_2)_{wb}] \cdot 100$  % maximum values within *E. huxleyi* bloom areas in the North, Norwegian, Greenland, Barents, and Bering Seas during 1998–2015 (Source: [Kondrik et al., 2018]).

The data are absent for some years and target seas as the respective  $(\Delta p\text{CO}_2)_w$  values proved to be lower than the assessed retrieval error of 23.4  $\mu\text{atm}$ . Some of the y-axes have different scales

enhancement of atmospheric CO<sub>2</sub> partial pressure could be expected over them as well. Unfortunately, OCO-2 data on XCO<sub>2</sub> for high latitudes are scarce and generally heavily quality flagged. At least for the two selected years, this precluded a direct determination of ΔXCO<sub>2</sub> over *E. huxleyi* blooms in the subpolar and polar seas mentioned above.

However, since it is the normalized ratio  $(\Delta p\text{CO}_2)_w / (p\text{CO}_2)_{wb}$  that controls the direction of the CO<sub>2</sub> flux in the atmosphere – ocean surface system, the closeness of the normalized ratio values found for such geographically disparate marine environments suggests that the effect of *E. huxleyi* blooms on CO<sub>2</sub> partial pressure increment in marine surface waters is not latitude-longitude specific.

It is also worth of noting that the blooms in the aforementioned seas are not extraordinarily extensive or denser than those in other marine environments in the world's oceans: there are reports on either comparable or even more vast and dense *E. huxleyi* blooms in both Northern and Southern Hemispheres [Brown, Yoder, 1994; Morozov et al., 2013; Balch et al., 2016].

Despite the obvious oneness of the *E. huxleyi* blooming phenomenon at subpolar and polar seas on the one hand and in the Black Sea on the other, one specific feature inherent in the Black Sea is worth mentioning, viz. the moment of the bloom onset: in the Black Sea it occurs much earlier. The registered *E. huxleyi* blooms in the Black Sea in 2015 and 2016 occurred during the time period between late April and late June, with the maximum in mid-May, which is supported by previous observations by e. g. [Oguz & Merico, 2006] see also refs. therein. This specific feature of the *E. huxleyi* outburst timing is known to be controlled by the timing of the preceding photosynthetic phytoplankton mass development. The latter increases the nitrogen to phosphorus (N:P) ratio and creates conditions favoring a successive development of *E. huxleyi* [Tyrrell, Merico, 2004]. Thus, this mechanism of water chemical "preparation" largely (but not exclusively) predetermines the timing of *E. huxleyi* bloom onset. As the outburst and eventual dying off of yearly spring phytoplankton (which are prevalently diatoms) occur in the Black Sea earlier than at high latitudes [Vinogradov et al., 1999; Moncheva et al., 2001], *E. huxleyi* blooms also start developing earlier.

In conclusion, we believe that the results reported here are of relevance to the phenomenon of *E. huxleyi* blooms in general and can be considered as a reference point in future large-scale studies, which are needed in order to attain quantitative assessments of the overall role of *E. huxleyi* blooms in the global carbon cycle.

We express our gratitude for the financial support of this study provided by the Russian Science Foundation (RSF) under the project number 17-17-01117. We also acknowledge the use of the Ocean Colour Climate Change Initiative dataset, Version 3.1, European Space Agency, available online at <http://www.esaoccolour-cci.org/>. XCO<sub>2</sub> data were produced by the OCO-2 project at the Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, and obtained from the OCO-2 data archive maintained at the NASA Goddard Earth Science Data and Information Services Center.

## References

- Balch W. M., Bates N. R., Lam P. J., Twining B. S., Rosengard S. Z., Bowler B. C., and Drapeau D. T. Factors regulating the Great Calcite Belt in the Southern Ocean, and its biogeochemical significance. *Global Biogeochem. Cy.* 2016. Vol. 30, no. 8. P. 1124–1144. doi: 10.1002/2016GB005414
- Brown C. W., Yoder J. A. Coccolithophorid blooms in the Global Ocean. *J. Geophys. Res.* 1994. Vol. 99. P. 7467–7482. doi: 10.1029/93JC02156
- Cokacar T., Kubilay N., and Oguz T. Structure of *Emiliania huxleyi* blooms in the Black Sea surface waters as detected by SeaWiFS imagery. *Geophys. Res. Lett.* 2001. Vol. 28, no. 24. P. 4607–4610. doi: 10.1029/2001GL013770
- Crisp D. Measuring atmospheric carbon dioxide from space with the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2). *Proceed. SPIE. Earth Observing Systems XX*, 960702 (Sept. 8, 2015). 2015. Vol. 9607. doi: 10.1117/12.2187291
- Dlugokencky E. Annual mean carbon dioxide data. NOAA ESRL. 2016.
- Garcia H. E., Locarnini R. A., Boyer T. P., Antonov J. I., Baranova O. K., Zweng M. M., Reagan J. R., and Johnson D. R. World Ocean Atlas 2013. Vol. 4: Dissolved inorganic nutrients (phosphate, nitrate, silicate). Eds. S. Levitus, A. Mishonov, Technical Eds. NOAA Atlas NESDIS 76. 2013.
- Iglesias-Rodrigues M. D., Brown C. W., Doney S. C., Kleypas J., Kolber D., Kolber Z., Hayes P. K., and Falkowski P. G. Representing key phytoplankton functional groups in ocean carbon cycle models: Coccolithophorids. *Global Biogeochem. Cy.* 2002. Vol. 16, no. 4. P. 47-1-47-20. doi: 10.1029/2001GB001454
- IPCC. Climate Change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. Core Writing Team, R. K. Pachauri, L. A. Meyer. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. 151 p.
- Key R. M., Olsen A., van Heuven S., Lauvset S. K., Velo A., Lin X., Schirnick C., Kozyr A., Tanhua T., Hoppe M., Jutterström S., Steinfeldt R., Jeansson E., Ishii M., Perez F. F., and Suzuki T. Global Ocean Data Analysis Project, Version 2 (GLODAP v2). 2015. URL: <http://cdiac.ornl.gov/oceans/GLODAPv2/> (accessed: 20.06.2019). doi: 10.3334/CDIAC/OTG.NDP093\_GLODAPv2
- Khoruzhyy D. S., Kondratyev S. I., Medvedev E. V., and Shutov S. A. Dinamika partial'nogo davleniya

uglekislogo gaza i kontsentratsii rastvorenogo kisloroda v shel'fovykh vodakh yuzhnogo berega Kryma v 2009–2010 gg. [Dynamics of the carbon dioxide partial pressure in the Southern Crimea shelf zone in 2009–2010]. *Ekol. bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa* [J. Ecol. Safety of the Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Exploitation of the Shelf Res.]. 2010. Vol. 21. P. 136–145.

Kondrik D., Kazakov E., and Pozdnyakov D. A Synthetic satellite dataset of the spatio-temporal distributions of *Emiliana huxleyi* blooms and their impact on Arctic and Sub-Arctic marine environments (1998–2016). *Earth System Sci. Data*. 2019. Vol. 11. P. 119–128. doi: 10.5194/essd-11-119-2019

Kondrik D. V., Pozdnyakov D. V., and Johannesen O. M. Satellite evidence that *E. huxleyi* phytoplankton blooms weaken marine carbon sinks. *Geophys. Res. Lett.* 2018. Vol. 45, no. 2. P. 846–854. doi: 10.1002/2017GL076240

Kondrik D. V., Pozdnyakov D. V., and Pettersson L. H. Particulate inorganic carbon production within *E. huxleyi* blooms in subpolar and polar seas: A satellite time series study (1998–2013). *Int. J. Rem. Sens.* 2017. Vol. 38, no. 22. P. 6179–6205. doi: 10.1080/01431161.2017.1350304

Konovalov S. K., Kondratyev S. I., Khoruzhiy D. S., Medvedev E. V., and Moiseenko O. G. Obshchii neorganicheskiy uglerod, karbonatnaya sistema i potoki uglekislogo gaza v pribrezhnoi zone yuzhnogo berega Kryma: monitoring, kharakteristika, dinamika [Total inorganic carbon, carbonate system and fluxes of carbon dioxide in the Crimean shelf zone: monitoring, characterization, dynamics]. *Monitoring pribrezhnoi zony na Chernomorskom eksperimental'nom podsputnikovom poligone* [Monitoring of the coastal zone in the Black Sea experimental sub-satellite testing area]. Eds. V. A. Ivanov, V. A. Dulov. Sevastopol: NAS of Ukraine, Marine Hydrophysical Institute, 2014. P. 335–372.

Moncheva S., Gotsis O., Pagou K., and Krastev A. Phytoplankton blooms in the Black Sea and Mediterranean coastal ecosystems subjected to anthropogenic eutrophication: similarities and differences. *Estuarine, Coastal and Shelf Sci.* 2001. Vol. 53, no. 3. P. 281–295. doi: 10.1006/ecss.2001.0767

Moore T., Dowel M. D., and Franz B. A. Detection of coccolithophore blooms in ocean color imagery: A generalized approach for use with multiple sensors. *Rem. Sens. Environ.* 2012. Vol. 117. P. 249–263. doi: 10.1016/j.rse.2011.10.001

Morozov E., Pozdnyakov D., Smyth T., Sychev V., and Grassl H. Space-borne study of seasonal, multi-year, and decadal phytoplankton dynamics in the Bay of Biscay. *Int. J. Rem. Sens.* 2013. Vol. 34, no. 4. P. 1297–1331. doi: 10.1080/01431161.2012.718462

Oguz T., and Merico A. Factors controlling the summer *Emiliana huxleyi* bloom in the Black Sea: A modeling

study. *J. Marine Syst.* 2006. Vol. 59, no. 3–4. P. 173–188. doi: 10.1016/j.jmarsys.2005.08.002

Olsen A., Key R. M., van Heuven S., Lauvset S. K., Velo A., Lin X., Schirnick C., Kozyr A., Tanhua T., Hoppe M., Jutterström S., Steinfeldt R., Jeansson E., Ishii M., Pérez F. F., and Suzuki T. The Global Ocean Data Analysis Project Version 2 (GLODAPv2) – an internally consistent data product for the World Ocean. *Earth System Sci. Data*. 2016. Vol. 8, no. 2. P. 297–323. doi: 10.5194/essd-8-297-2016

Özsoy E., and Ünlüata Ü. Oceanography of the Black Sea: A review of some recent results. *Earth-Sci. Rev.* 1997. Vol. 42, no. 4. P. 231–272. doi: 10.1016/S0012-8252(97)81859-4

Robertson J. E., Robinson C., Turner D. R., Holligan P., Watson A. J., Boyd P., Fernandez E., and Finch M. The impact of a coccolithophore bloom on oceanic carbon uptake in the northeast Atlantic during summer 1991. *Deep Sea Res.* 1994. Vol. 41, no. 2. P. 297–314. doi: 10.1016/0967

Shutler J. D., Land P. E., Brown C. W., Findlay H. S., Donlon C. J., Medland M., Snooke R., and Blackford J. C. Coccolithophore surface distributions in the North Atlantic and their modulation of the air-sea flux of CO<sub>2</sub> from 10 years of satellite earth observation data. *Biogeosciences*. 2013. Vol. 10. P. 2699–2709. doi: 10.5194/bg-10-2699-2013

Smyth T. J., Tyrrell T., and Tarrant B. Time series of coccolithophore activity in the Barents Sea from twenty years of satellite imagery. *Geophys. Res. Lett.* 2004. Vol. 31. doi: 10.1029/2004GL019735

Tyrrell T., and Merico A. *Emiliana huxleyi*: bloom observations and the conditions that induce them. In *Coccolithophores: from molecular processes to global impact*. Eds. H. R. Thierstein and J. R. Young. Berlin: Springer, 2004. P. 75–97. doi: 10.1007/978-3-662-06278-4\_4

Vinogradov M. E., Shushkina E. A., Mikaelyan A. S., and Nezhlin N. P. Temporal (seasonal and interannual) changes of ecosystem of the open waters of the Black Sea. In *Environmental Degradation of the Black Sea: Challenges and Remedies*. Eds. S. T. Beşiktepe, Ü. Ünlüata, and A. S. Bologa. NATO Science Partnership Subseries: 2(56). Dordrecht: Springer Netherlands, 1999. P. 109–129. doi: 10.1007/978-94-011-4568-8\_8

Wu L., Hasekamp O., Hu H., Landgraf J., Butz A., van de Brugh J., Aben I., Pollard D. F., Griffith D. W. T., Feist D. G., Koshelev D., Hase F., Toon G. C., Ohyama H., Morino I., Notholt J., Shiomi K., Iraci L., Schneider M., de Mazière M., Sussmann R., Kivi R., Warneke T., Goo T.-Y., and Té Y. Carbon dioxide retrieval from OCO-2 satellite observations using the RemoTeC algorithm and validation with TCCON measurements. *Atmos. Meas. Tech.* 2018. Vol. 11. P. 3111–3130. doi: 10.5194/amt-11-3111-2018

Received July 08, 2019

## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

### **Кондрик Дмитрий Вячеславович**

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

### **Казakov Эдуард Эдуардович**

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

### **Поздняков Дмитрий Викторович**

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

### **Йоханнесен Ола Матиас**

Президент Научного Общества имени Нансена;  
Президент Уставного Фонда Нансен-Центров в Норвегии  
и Санкт-Петербурге; Почетный профессор Геофизического  
Института при университете Бергена, Норвегия  
Берген, Норвегия, 5006  
эл. почта: ola.johannessen@nansenscientificsociety.no

## **CONTRIBUTORS:**

### **Kondrik, Dmitry**

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

### **Kazakov, Eduard**

Scientific Foundation “Nansen Environmental  
and Remote Sensing Centre”  
14<sup>th</sup> Line, 7, Office 49, Vasilievsky Island, 199034  
St. Petersburg, Russia  
e-mail: ekazakov@niersc.spb.ru

### **Pozdnyakov, Dmitry**

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

### **Johannessen, Ola**

Nansen Scientific Society; Nansen Centres in St. Petersburg  
and Bergen; Geophysical Institute, University of Bergen  
Kong Christian Frederiks Plass 6, 5006 Bergen, Norway  
e-mail: ola.johannessen@nansenscientificsociety.no

УДК 556 + 528.8 + 681.3:574.4

## **ГИС ЭКОСИСТЕМ ВОДОСБОРА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ОЦЕНКИ КОМПОНЕНТОВ ВОДНОГО И УГЛЕРОДНОГО БАЛАНСА**

**П. Ю. Литинский**

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

ГИС интегрирует данные о структуре и динамике наземных экосистем водосборов притоков Онежского озера, а также о рельефе и гидрографической сети на основе модели высот с пространственным разрешением 3". В статье приводится подробное описание методики создания основных слоев ГИС, включая скрипты пакетов открытого доступа GDAL, GRASS, SAGA. Суммарное поступление терригенных органических веществ в озеро определяется пространственной структурой биогеоценозов в пределах водосбора. Структура и динамика экосистем водосборов выявляется по снимкам Landsat с использованием оригинальной методики моделирования спектрального пространства, которая обеспечивает выделение биогеоценологических комплексов (четвертичные отложения + растительность). Каждому типу четвертичных отложений свойственна определенная степень водопроницаемости грунтов и величины поверхностного стока, каждый тип биогеоценоза синтезирует определенное количество первичной продукции, часть которой в виде гумусовых веществ переносится с поверхностным стоком в водоемы. Принципиально новый уровень структуризации земной поверхности позволяет повысить достоверность расчетов, уточнить существующие данные по поступлению терригенного углерода в экосистему озера. Впервые получена пространственная информация по структуре экосистем водосборов как всего озера, так и всех его притоков, по сопоставимой методике. Это позволяет более обоснованно экстраполировать результаты гидрохимических измерений на отдельных притоках на весь водосбор. С другой стороны, использование ГИС способствует выявлению пробелов в гидрохимических данных и обеспечивает оптимальное планирование натурных исследований.

**Ключевые слова:** Онежское озеро; геоинформационное моделирование; наземные экосистемы; водосбор; органический углерод.

### **P. Yu. Litinsky. ONEGO LAKE CATCHMENT ECOSYSTEM GIS AS A TOOL FOR ESTIMATING COMPONENTS OF THE WATER AND CARBON BALANCE**

The GIS integrates data on the structure and dynamics of the terrestrial ecosystems in the catchments of Lake Onego tributary streams, as well as on the relief and hydrographic network based on a height model with a spatial resolution of 3". The article provides a detailed description of the methodology for creating basic GIS layers, including scripts for open access packages (GDAL, GRASS, SAGA). The total flow of terrigenous organic matter into the lake is determined by the spatial structure of the biogeocenoses in the catchment area. The structure and dynamics of the catchment ecosystems are detected from Landsat images using an original spectral space modeling technique, which

enables the isolation of biogeocenotic complexes (Quaternary sediments + vegetation). Each type of Quaternary sediments is characterized by a certain degree of water permeability of soils and the magnitude of surface runoff; each type of biogeocenosis produces a certain amount of net ecosystem production, part of which in the form of humus substances is transferred with surface runoff to water bodies. A fundamentally new level of structuring of the earth's surface allows to enhance the reliability of calculations, to clarify existing data on the flow of terrigenous carbon into the lake ecosystem. For the first time, spatial information was obtained on the structure of the catchment ecosystems for both the entire lake and all its tributaries, according to a comparable methodology. This makes it possible to more reasonably extrapolate the results of hydrochemical measurements from individual tributaries to the entire catchment. On the other hand, the use of GIS helps to identify gaps in hydrochemical data and provides for optimal planning of field studies.

**Key words:** Lake Onego; geoinformation modeling; terrestrial ecosystems; catchment; organic carbon.

## Введение

Геоинформационная модель водосбора Онежского озера создается для комплексного анализа функционирования его гетеротрофной экосистемы, в первую очередь – для расчета поступления терригенного органического углерода (DOC) в условиях изменения климата [Литинский, 2018]. На первом этапе была получена модель наземных экосистем территории, сформирована цифровая модель высот и на ее основе определены общие границы водосбора. Следующий шаг – получение границ водосборов всех притоков озера и определение соотношения типов экосистем в пределах каждого водосбора. Эти данные необходимы для экстраполяции гидрологических и гидрохимических характеристик изученных притоков на неизученные. Для решения этой задачи был разработан комплекс программ (скриптов ГИС-пакетов открытого доступа GDAL, GRASS, SAGA). Ввиду большого количества притоков расчеты требуют большой вычислительной мощности, поэтому они были организованы на вычислительном кластере КарНЦ РАН. В статье приводится подробное описание всей последовательности этих операций, а также, в качестве примера, сравнительная характеристика экосистем основных водосборов по наиболее контрастным категориям и возможные пути использования этих данных.

## Методика

Для моделирования рельефа и гидрографической сети используется цифровая модель высот с пространственным разрешением 3" (приблизительно 50×90 м) и 1 м по высоте (<http://viewfinderpanoramas.org>). Она не лишена отдельных ошибок, но тем не менее на ее

основе впервые стал возможен относительно точный расчет контуров водосборов, линий аккумуляции стока, а также различных геоморфометрических характеристик, влияющих на образование и транспорт DOC. Далее приводится ряд пакетных файлов, содержащих команды, необходимые для создания слоев ГИС.

Водосбор Онежского озера находится в пределах 60–64° с. ш. и 30–39° в. д. Модель высот (DEM) формируется из отдельных растров размером 1×1 градус (*n60e030.hgt* – *n63e038.hgt*), находящихся в архивах *P36.zip* и *P37.zip* на вышеуказанном сайте. Сборка осуществляется пакетным файлом:

```
<nul set /p s=gdal_merge -o d.tif > dem.bat
for /l %%i in (30 1 38) do (for /l %%j in (60 1 63) do (
<nul set /p s=n%%je0 %%i.hgt >>dem.bat))
dem
```

В результате его работы создается растр *dem.tif* размером 10801×4801 пикселей в проекции EPSG:4326 (широта/долгота, эллипсоид wgs84). Для получения контуров водосборов необходимы растры аккумуляции (*acc*) и направлений (*dr*) стока, они рассчитываются в пакете GRASS, в который и импортируется растр *dem.tif*:

```
r.in.gdal i=dem.tif out=dem -o
g.region rast=dem
r.watershed elev=dem acc=acc drainage=dr -s
```

При анализе растра *acc* в некоторых участках территории обнаруживаются ошибки, искажающие реальную структуру водотоков. Для их коррекции создается файл *hcorr.shp* с полигонами, описывающими виртуальные «плотины и каналы», перекрывающие ложные водотоки и формирующие нужные русла, значения их высотных отметок заносятся в поле *h*. Затем эти изменения вносятся в файл *dem.tif*:

```
gdal_rasterize hcorr.shp dem.tif -a h
```

После этого необходимо заново создать растры *acc* и *dr*.

Для автоматического получения контуров водосборов притоков и расчета площадей различных категорий экосистем в границах водосборов необходимо в первую очередь определить координаты устьев притоков (рис. 1). Сначала по модели высот *dem.tif* выделяются области нулевых уклонов (водные зеркала озера) и векторизуются в файл *s0.shp*:

```
gdaldem_slope dem.tif slope.tif -p -s 1.0
gdal_calc -A slope.tif --outfile=s0.tif --calc="A==0"
--NoDataValue=0
gdal_polygonize s0.tif -f "ESRI Shapefile" s0.shp
```

В слое *s0.shp* выделяется полигон, соответствующий зеркалу Онежского озера, остальные полигоны удаляются. Вокруг полигона создается буферная зона шириной  $0.002^\circ$ . Это необходимо потому, что внутри полигона в некоторых участках линии аккумуляции стока идут вдоль береговой линии, создавая ложные координаты устьев. Внешний контур буферной зоны трансформируется в линию *lbuf.shp*:

```
saga_cmd shapes_tools 18-SHAPES=s0.shp
-BUFFER=bu -DIST_FIELD_DEFAULT=0.002
ogr2ogr -nlt LINESTRING lbuf.shp bu.shp
```

Затем находятся точки пересечения буферной линии с линиями аккумуляции стока (устья притоков), их координаты записываются в файл *out.csv*:

```
v.in.ogr i=lbuf.shp ou=lbuf -o
g.region rast=acc
v.to.rast input=lbuf output=wpoints use=attr attribute_
column=ID
r.mapcalc expression="calc = if (wpoints>0 &&
acc>1000, wpoints, 0)"
r.null map=calc setnull=0
r.to.vect i=calc o=calc type=point -v
v.out.ascii input=calc output=out.csv format=point
separator=","
```

Количество притоков и их водосборов определяется пороговой величиной значения раstra аккумуляции стока (иначе говоря, площадью локального водосбора), которая задается в параметре модуля *r.mapcalc* (*acc>1000*) при определении координат точек устьев (4-я строка приведенного выше файла).

По координатам из файла *out.csv* получаем сначала растр, затем векторный полигон водосбора, экспортируем его в shp-файл и трансформируем в проекцию раstra модели экосистем *em.tif* – EPSG:32636 (36 зона utm, эллипсоид wgs84). Из раstra вырезаются огра-

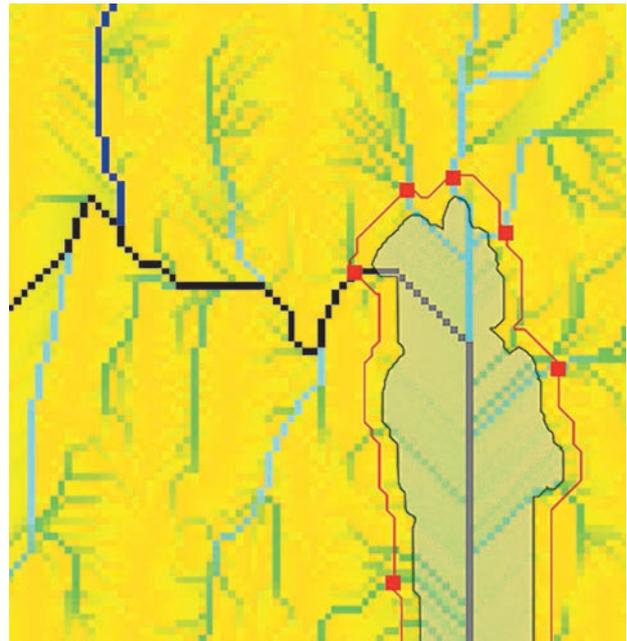


Рис. 1. Схема формирования водосборов притоков. Красные точки – пересечения буферной зоны береговой линии и линий аккумуляции стока (координаты в файле *out.csv*)

Fig. 1. Scheme of tributaries outlets finding. The red points are the intersections of the shore buffer line and the flow accumulation lines

ненные водосбором фрагменты, рассчитываются их гистограммы, которые собираются в файл *pie.txt*. По гистограммам определяются площади каждой категории раstra *em.tif* в пределах каждого водосбора, исходя из площади пиксела ( $900 \text{ m}^2$ ).

```
setlocal enabledelayedexpansion
set n=0
for /F "tokens=1,2 delims=," %%i in (out.csv) do (
set /a n+=1
r.water.outlet input=dr output=ou
coordinates=%%i,%%j
r.to.vect input=ou output=ou type=area -s -v
v.out.ogr input=ou f=ESRI_Shapefile ou=w/n!.shp
ogr2ogr w/n!.shp b/n!.shp -s_srs EPSG:4326-t_srs
EPSG:32636
gdalwarp -q -cutline b/n!.shp -crop_to_cutline
-dstnodata 0 em.tif /n!.tif
gdalinfo -hist -nomd -noct /n!.tif > _pie
)
findstr '000' _pie>pie.txt
```

Векторный слой гидрографической сети *river.shp* образуется путем векторизации раstra аккумуляции стока:

```
r.mapcalc expression="riv=int (if (acc>5000, 1))"
r.thin input=riv output=rivt --o
r.to.vect i=rivt ou=riv type=line -v -s
v.out.ogr input=a type=line ou=river.shp -c
```

Спектральные классы (номера соответствуют рис. 2) Spectral classes (numbers as in Fig. 2)		Четвертичные отложения, рельеф, тип ландшафта Quaternary deposits landscape context /Position in relief
1	Сосняки зеленомошные Mixed Pine/Spruce stands on moraine	Моренные холмы Moraine hill
2	Низкополотные хвойные Sparse conifers stands	Озерные равнины – ельники Lakustrin planes – Spruce Холмы денудационно-тектонические (тонкий слой морены) – сосняки Denudation-tectonic hills (thin moraine) – Pine
3	Сосняки брусничные Pine stands on sand	Флювиогляциальные дельты Fluvioglacial deltas
4	Сосняки скальные Pine stands on rock	Скальные обнажения No deposits
5	Сосняки багульниковые Pine stands on shallow peat (Ledum type)	Озерные равнины Lakustrin planes
6	Сосняки сфагновые Pine stands (Sphagnum type)	Озерные равнины, локальные депрессии Lakustrin planes, local depressions
7	Сосняки осоково-сфагновые Pine stands (Carex-Sphagnum type)	
8	Высокополотные ельники Dense spruce stands	Моренные холмы Moraine hill
11–15	Возобновление сосны Pine regeneration	Озерные равнины, локальные депрессии Lakustrin planes, local depressions
21–24	Болота мезотрофные Mesotrophic bogs	
41–44	Болота олиготрофные Oligotrophic bogs	
81–85	Нерастительные категории Non-vegetation	

Методика создания модели растительного покрова (в данном случае представленная в виде раstra *em.tif*) подробно описана ранее [Литинский, 2018]. Она основана на создании по данным наземных ключевых участков трехмерной модели определенным образом трансформированного спектрального пространства сканерного снимка. Модель четко отражает естественную структуру растительного покрова, определяемую типом четвертичных отложений и условиями водно-минерального питания, и обеспечивает выделение различных типов и стадий антропогенных нарушений экосистем. Информативность модели еще более возрастает при использовании рассчитанных по DEM геоморфометрических показателей и ландшафтного контекста (табл.).

### Результаты и обсуждение

Полученная по данной методике модель растительного покрова характеризуется высокой мозаичностью, что затрудняет выявление наиболее существенных различий между водосборами. В связи с этим на первом этапе для об-

зорного анализа было решено генерализовать модель до минимального количества наиболее контрастных по величине экспорта углерода категорий. В бореальной зоне, в автоморфных условиях 1–2 % чистой продукции экосистем поступает в гидросферу, в гидроморфных местообитаниях эта величина достигает 10–20 %, различия же в пределах этих двух категорий невелики [Canham et al., 2004]. Исходя из этого, все классы модели спектрального пространства объединены в четыре группы: 1) озера; 2) открытые болота (олиготрофные и мезотрофные); 3) лесные и другие растительные экосистемы автоморфных местообитаний; 4) лишённые растительности категории (рис. 2).

Пример тематической карты водосбора, полученный по данной методике, приведен на рис. 3, общая структура водосборов притоков – на рис. 4, сравнительная диаграмма характеристик водосборов основных притоков – на рис. 5.

До настоящего времени при расчете водного баланса Онежского озера границы водосборов притоков, их озерность и заболоченность определялись по топографическим картам масштаба 1:200 000 [Крупнейшие...

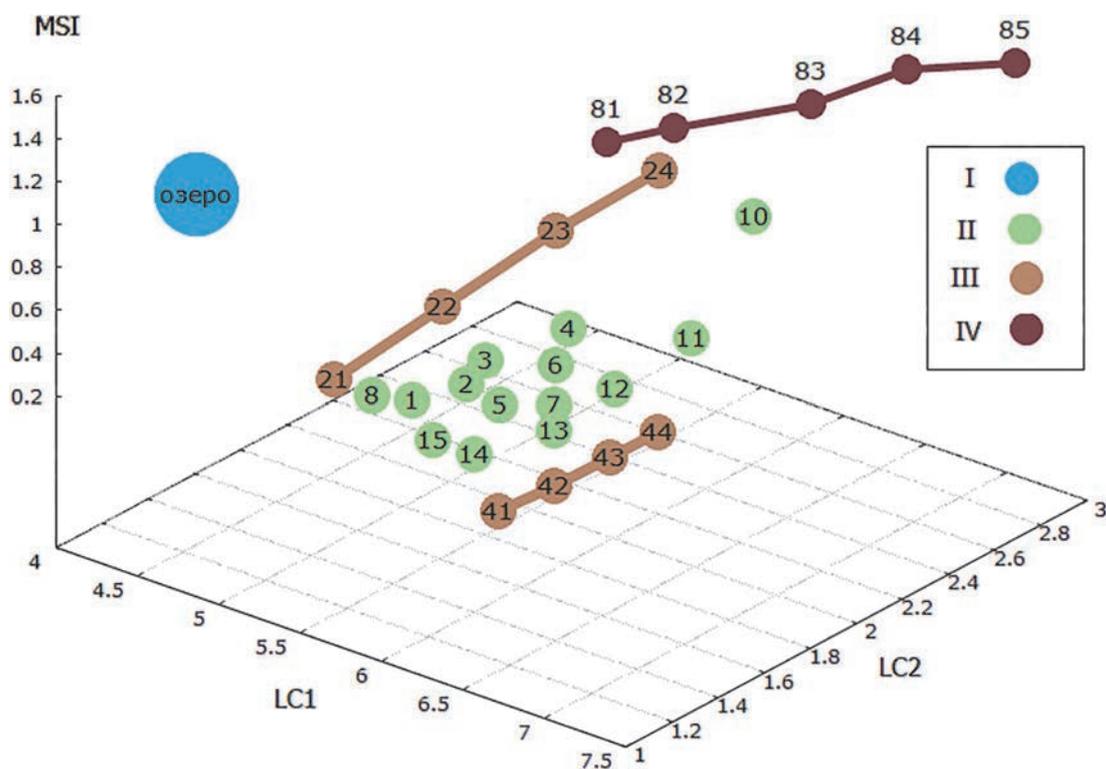


Рис. 2. Модель спектрального пространства снимка Landsat. Цветовая схема (здесь и на рис. 3, 5): I – озера; II – лесные и другие растительные экосистемы; III – открытые болота; IV – нерастительные категории. Номера классов приведены в таблице

Fig. 2. Landsat image spectral space model. Tonality (here and in Fig. 3, 5): I – lakes; II – forest and other vegetation classes; III – peatlands; IV – non-vegetation. The numbers of the classes are given in Table

2015, с. 34]. Затем эти данные использовались для оценки поступления в озеро органического углерода [Сабылина и др., 2016]. Границы водосборов и их озерность на картах такого масштаба можно определить с достаточной для практических целей точностью, но контуры болот на них нанесены весьма приблизительно, а информация о структуре и тем более о состоянии экосистем на них отсутствует. Сравнение показателей водосборов, полученных методом моделирования спектрального пространства (рис. 5) с данными, приведенными в вышеуказанных источниках, показывает, что общие площади водосборов и их озерность практически совпадают (в пределах 1–1,5%), но расхождения в степени заболоченности существенно выше, до нескольких процентов.

В связи с этим нужно отметить, что сама по себе «степень заболоченности» – величина весьма размытая, ее нельзя характеризовать одной цифрой. Модель спектрального пространства (рис. 2) показывает, что болотные экосистемы занимают большую часть (точнее, две большие части) спектрального пространства, соответственно, существенно различны и их

характеристики, в том числе гидрологические. Это же относится и к лесным экосистемам.

Следует подчеркнуть, что на рис. 3–5 представлена лишь крайне незначительная часть имеющейся в настоящее время информации. По всем водосборам притоков по вышеописанной методике можно получить карты и диаграммы (рис. 3) по всем категориям, представленным в спектральной модели (рис. 2), а с учетом декомпозиции по рельефу и ландшафтному контексту (табл.) количество категорий увеличивается еще в несколько раз. Таким образом, обеспечивается принципиально новый уровень структуризации земной поверхности, причем не только по количеству распознаваемых категорий. Как показывает таблица, выделяются основные типы биогеоценологических комплексов (четвертичные отложения + растительность). Каждому типу четвертичных отложений свойственна определенная степень водопроницаемости грунтов и величины поверхностного стока, каждый тип биогеоценоза синтезирует определенное количество первичной продукции, часть которой в виде гумусовых веществ переносится с поверхностным стоком в водоемы.

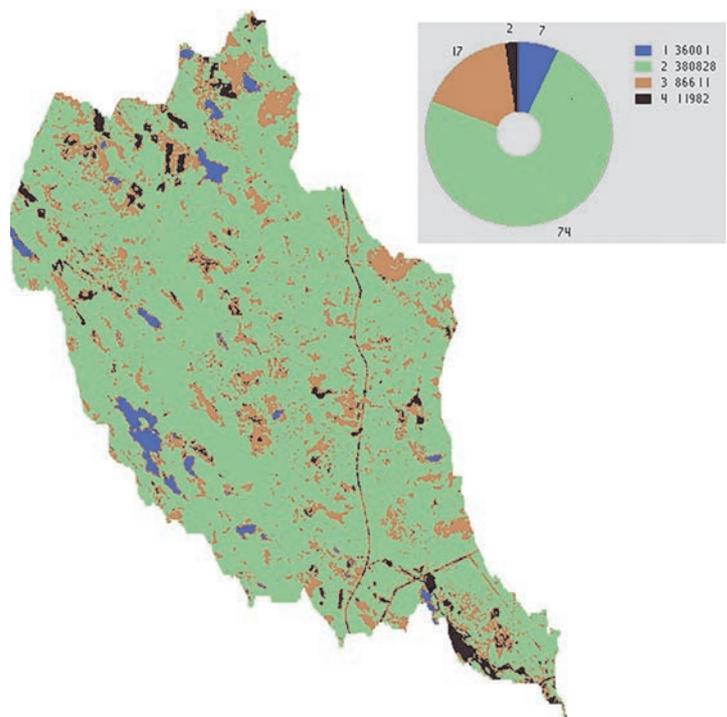


Рис. 3. Слева – водосбор р. Вичка, самого северного притока (файл *w1.tif*). Круговая диаграмма построена по данным файла *pie.txt*

Fig. 3. The Vichka catchment, the north tributary (*w1.tif*), is on the left. The pie chart is based on the *pie.txt* file

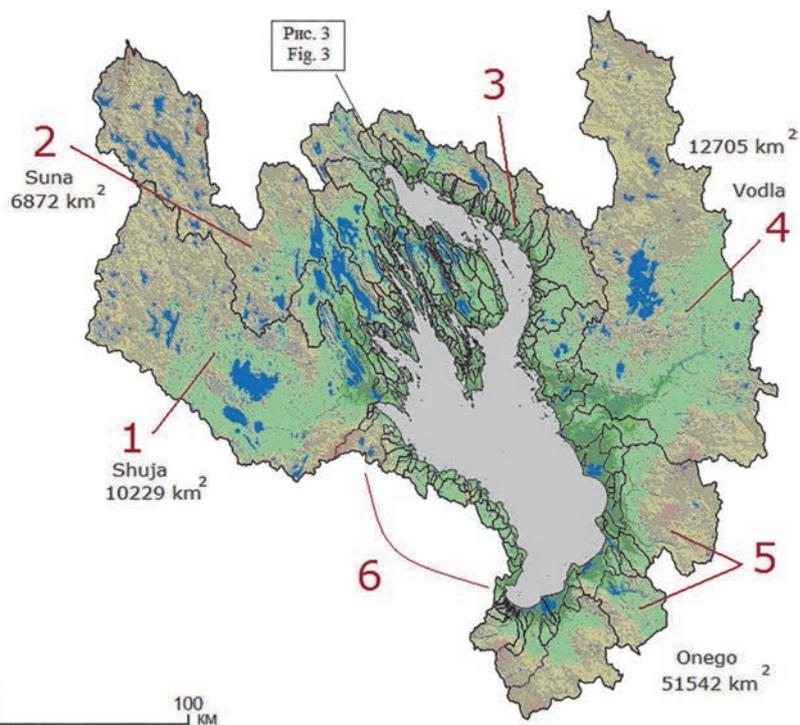


Рис. 4. Структура водосборов притоков Онежского озера (объединение всех файлов *w\*.shp*):

1 – р. Шуя, 2 – р. Суна, 3 – малые северо-восточные притоки, 4 – р. Водла, 5 – юго-восточные притоки, 6 – малые юго-западные притоки

Fig. 4. The Lake Onego tributaries catchments structure (all the *w\*.shp* files):  
1 – Shuja, 2 – Suna, 3 – short NE tributaries, 4 – Vodla, 5 – SE tributaries, 6 – short SW tributaries

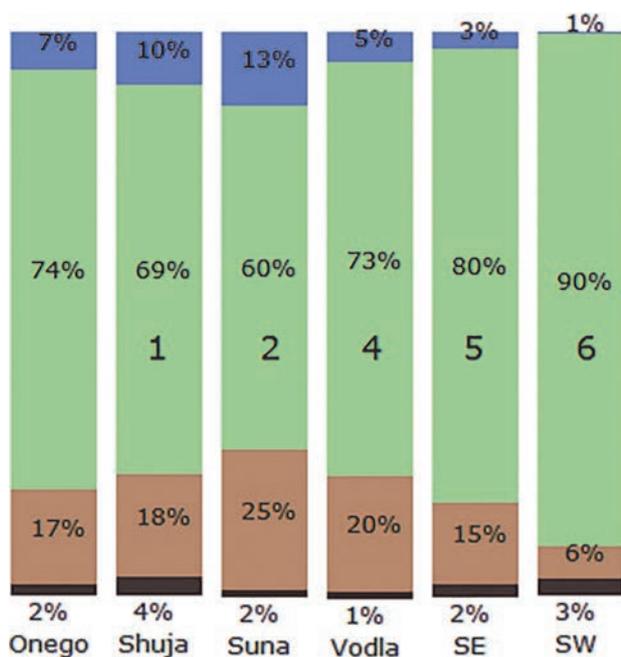


Рис. 5. Соотношения категорий земной поверхности водосборов озера в целом (слева) и основных притоков (номера соответствуют рис. 4)

Fig. 5. Ratio of land surface categories of the Lake Onego catchments as a whole (left) and its main tributaries (numbers as in Fig. 4)

Таким образом, расчеты водного баланса и поступления терригенного углерода целесообразно проводить комплексно, используя информацию ГИС для экстраполяции данных изученных водосборов на неизученные. Кроме того, ГИС дает пространственную основу для моделирования всего процесса формирования поверхностного стока от водоразделов по лесным и болотным экосистемам до притоков и водоемов. Только таким способом можно прогнозировать изменения экспорта углерода в условиях изменения климата, в частности, учитывая отдельно летний сток с лесных экосистем и зимний – с болот. С другой стороны, использование ГИС способствует выявлению пробелов в гидрохимических данных и обеспечивает оптимальное планирование натурных исследований.

В перспективе, когда будут включены в анализ более детальные характеристики экосистем, чем лесистость и заболоченность, при экстраполяции могут использоваться количественные методы ландшафтной экологии, реализованные в пакетах GRASS, SAGA [McGarigal, Marks, 1995]. Это различные индексы, описывающие закономерности пространственной организации растительного покрова: индекс фрагментации [Monmonier, 1974], индексы разнообразия (*diversity*), относительного обилия (*relative richness*) и доминирования (*domi-*

*nance*) [Turner, 1989], NDC (*number of different classes*), CVN (*center versus neighbor*), BCM (*binary comparison matrix*), повторяемости классов (*class frequency*) [Murphy, 1985].

На данном этапе можно привести пример использования ГИС для оценки поступления терригенных веществ в Онежское озеро в условиях изменений климата. В последние годы установлено увеличение содержания железа и фосфора в водах р. Шуя в зимний сезон. Предполагается, что это связано с увеличением зимнего стока гумусовых веществ с болот [Калинкина и др., 2018]. На других притоках гидрохимических наблюдений в этот период не проводилось. Рис. 5 показывает, что степень заболоченности водосбора р. Шуя близка к значению этой величины для всего водосбора Онежского озера. Это позволяет, исходя из соотношения площадей водосборов (около 20%), в первом приближении оценить увеличение поступления железа, фосфора и органического углерода в Онежское озеро в целом.

## Заключение

ГИС водосбора Онежского озера включает как абиотические (физико-географические), так и биотические (экосистемные) параметры водосборов. Физико-географические слои – растры аккумуляции и направлений стока и получаемые из них векторные контуры водосборов и линии водотоков. Эти слои формируются на основе DEM с использованием стандартных операций, реализованных в пакете GRASS. Биотические слои, описывающие структуру и динамику наземных экосистем, создаются с использованием оригинального метода извлечения информации из сканерных снимков Landsat TM/ETM+/OLI, достоверно выявляющего биогеоэкологическую структуру территории. Таким образом, описываемая ГИС обеспечивает принципиально новый уровень структуризации земной поверхности, что позволяет повысить достоверность расчетов компонентов водного и углеродного баланса Онежского озера, уточнить существующие данные по поступлению терригенного углерода в его экосистему.

Создание ГИС экосистем на основе данных сканирования – постепенный, итерационный процесс, с постоянным совершенствованием методики, подключением новых данных, переосмыслением и корректировкой ранее полученных результатов. На первом этапе использования описываемой ГИС впервые получена пространственная информация о структуре экосистем водосборов всех притоков Онежского озера по сопоставимой объективной методи-

ке. Это позволяет более обоснованно экстраполировать результаты гидрохимических наблюдений на отдельных притоках на весь водосбор. В перспективе планируется объединение данной ГИС с создаваемой параллельно аналогичной системой для водосборов других озер (блок экспертной системы «Озера Карелии»), имея конечной целью включение их в глобальную модель климатической системы Земли.

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

## Литература

*Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 375 с.*

*Калинкина Н. М., Филатов Н. Н., Теканова Е. В., Балаганский А. Ф. Многолетняя динамика стока железа и фосфора в Онежское озеро с водами р. Шуя в условиях климатических изменений // Региональная экология. 2018. № 2(52). С. 65–73. doi: 10.30694/1026-5600-2018-2-65-73*

## References

*Krupneishie ozera-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh [The largest lake-reservoirs in the North-West of the European part of Russia: current state and change of ecosystems under climatic and anthropogenic influences]. Ed. N. N. Filatov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. 375 p.*

*Kalinkina N. M., Filatov N. N., Tekanova E. V., Balaganskii A. F. Mnogoletnyaya dinamika stoka zheleza i fosfora v Onezhskoe ozero s vodami r. Shuya v usloviyakh klimaticheskikh izmenenii [The long-term dynamics of the flow of iron and phosphorus to Lake Onega with the waters of the Shuya in the context of climate change]. *Regional'naya ekol.* [Regional Ecol.]. 2018. No. 2(52). P. 65–73. doi: 10.30694/1026-5600-2018-2-65-73*

*Litinskii P. Prostranstvenno-vremennaya model' nazemnykh ekosistem vodosbora Onezhskogo ozera [Spatial-temporal model of terrestrial ecosystems in Lake Onego catchment]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2018. No. 3. P. 94–106. doi: 10.17076/lim742*

*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 [Organic carbon, total phosphorus, and total nitrogen inflow to Lake Onego with*

*Литинский П. Ю. Пространственно-временная модель наземных экосистем водосбора Онежского озера // Труды КарНЦ РАН. 2018. № 3. С. 94–106. doi: 10.17076/lim742*

*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*

*Canham C. D., Pace M. L., Papaik M. J., Primack A. G. B., Roy K. M., Maranger R. J., Curran R. P., Spada D. M. A spatially explicit watershed-scale analysis of dissolved organic carbon in Adirondack lakes // *Ecol. Applications*. 2004. Vol. 14. P. 839–854. doi: 10.1890/02-5271*

*McGarigal K., Marks B. J. Fragstats: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. General Technical Report PNW-GTR-351, USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, Oregon, 1995. 134 p.*

*Monmonier M. S. Measures of pattern complexity for choropleth maps // *The American Cartographer*. 1974. Vol. 1, no. 2. P. 159–169.*

*Murphy D. L. Estimating neighborhood variability with a binary comparison matrix // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1985. Vol. 51, no. 6. P. 667–674.*

*Turner M. G. Landscape ecology: The effect of pattern on process // *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 1989. Vol. 20. P. 171–197.*

*Поступила в редакцию 14.05.2019*

*stream runoff, and their removal by the Svir River waters in 1965–2008]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2016. No. 9. P. 68–77. doi: 10.17076/lim307*

*Canham C. D., Pace M. L., Papaik M. J., Primack A. G. B., Roy K. M., Maranger R. J., Curran R. P., Spada D. M. A spatially explicit watershed-scale analysis of dissolved organic carbon in Adirondack lakes. *Ecol. applications*. 2004. Vol. 14. P. 839–854. doi: 10.1890/02-5271*

*McGarigal K., Marks B. J. Fragstats: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. General Technical Report PNW-GTR-351, USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, Oregon, 1995. 134 p.*

*Monmonier M. S. Measures of pattern complexity for choropleth maps. *The American Cartographer*. 1974. Vol. 1, no. 2. P. 159–169.*

*Murphy D. L. Estimating neighborhood variability with a binary comparison matrix. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1985. Vol. 51, no. 6. P. 667–674.*

*Turner M. G. Landscape ecology: The effect of pattern on process. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 1989. Vol. 20. P. 171–197.*

*Received May 14, 2019*

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:****Литинский Петр Юрьевич**

старший научный сотрудник лаб. гидробиологии, к. с.-х. н.  
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185030  
эл. почта: litinsky@sampo.ru

**CONTRIBUTOR:****Litinsky, Pyotr**

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: litinsky@sampo.ru  
tel.: (8142) 768160

УДК 001.891.57: [639.2.05:330.59] (470.20)

## КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЫБОЛОВСТВА НА УРОВЕНЬ ЖИЗНИ НАСЕЛЕНИЯ БЕЛОМОРЬЯ

**В. В. Меншуткин<sup>1</sup>, Н. Н. Филатов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Институт проблем региональной экономики РАН, Санкт-Петербург, Россия

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

Рассматривается динамическая система, которая включает в себя не только рыболовство, но и комплекс демографических, экологических и социальных изменений, происходящих в Беломорье. Используется когнитивное моделирование, чтобы всесторонне рассмотреть возможность повышения уровня жизни населения с использованием рыболовства в условиях климатических изменений, рыночной экономики, антропогенных воздействий, загрязнения, эвтрофирования моря и др. факторов, влияющих на условия воспроизводства, численность рыб, а также условия проживания населения. Необходимость применения когнитивного моделирования обусловлена также размытостью и нечеткостью исходных данных системы. Кратко описаны современные проблемы рыбной отрасли региона, во многом обусловленные различного рода административными барьерами, особенностями рыночной экономики и несовершенством рыбохозяйственного законодательства. В настоящей работе целевая функция управления сложной социо-эколого-экономической системой направлена на достижение высокого уровня жизни населения с использованием рыболовства – одного из важнейших занятий местных жителей. При создании когнитивной модели применены концептуальное моделирование и математический аппарат непрерывной или размытой логики.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** рыболовство; уровень жизни населения; когнитивное моделирование; климат; экономика; экосистемы.

### **V. V. Menshutkin, N. N. Filatov. COGNITIVE MODELING OF THE FISHERIES EFFECT ON THE STANDARD OF LIVING IN THE WHITE SEA AREA**

A dynamic system that includes not only fishing, but also a set of demographic, environmental and social changes taking place in the White Sea area is discussed in the paper. Cognitive modeling is used to examine the possibilities of improving the living standards of the population using fisheries in the context of climate change, market economy, anthropogenic impacts, pollution, eutrophication of the sea and other factors affecting the reproduction and numbers of fish, as well as the living conditions of people. One of the reasons to apply cognitive modeling is the fuzziness of the input data for the system. The current problems in the region's fishing industry, mainly arising from various administrative barriers, features of the market economy and flaws of the fisheries legislation, are briefly described. In this work, the target function of managing a complex socio-ecological-economic system is to achieve a high standard of living for the population using fisheries – one of the most important occupations of local people. Conceptual modeling and the mathematical toolkit of continuous or fuzzy logic were employed to create the cognitive model.

## Введение

Рыбное хозяйство играет большую социально-экономическую роль в Беломорье, являясь важным источником обеспечения продуктами питания, одним из источников занятости проживающего здесь населения, в том числе коренных народов [Иконникова и др., 2015]. Рыболовство в регионе осуществляется как в Белом море, так и на внутренних пресноводных водоемах, которыми богат Карело-Кольский регион. Здесь также активно развивается товарное рыбоводство и аквакультура. Важной составляющей рыбного хозяйства являются рыбообработывающие предприятия. В результате рыночных преобразований в 1991 г. единый рыбохозяйственный комплекс в Беломорье распался по региональному признаку. В новых условиях отмечается слабая управляемость рыболовством прибалтийских субъектов федерации, которые практически не взаимодействуют друг с другом [Шерстков и др., 2009; Фомин, 2016]. Смена социально-экономической модели общественного устройства страны привела к негативным последствиям в рыбном хозяйстве. Промысловый флот лишился государственной финансовой поддержки, почти на 70 % сократилась численность персонала в рыбной отрасли. Вылов рыбы и выпуск товарной рыбной продукции к 2015 г. сократился более чем в 2,2 раза по сравнению с 1990 г. При ухудшении социально-экономической ситуации резко возросло несанкционированное рыболовство (браконьерство) и отмечается серьезное падение рыбных запасов в море. Кроме морского промысла регион располагает большим водным фондом внутренних водоемов и прибрежных акваторий, что позволяет с успехом заниматься рыбохозяйственной деятельностью, в том числе аквакультурой. В Республике Карелия, например, производится около 70 % форели, выращиваемой в России [Стерлигова и др., 2018]. Здесь по сравнению с другими субъектами РФ, входящими в Беломорье, имеется соответствующая инфраструктура: близость районов лова и фермерских хозяйств к транспортным магистралям, населенным пунктам. Но при этом садковое рыбоводство существенно влияет на эвтрофирование и загрязнение пресноводных водоемов, поэтому в скандинавских странах садковое рыбоводство в основном перенесено в море. В регионе также имеются хорошие условия для

разведения форели, мидий в Белом море. Таким образом, важно предусмотреть перспективы использования моря для садкового рыбоводства. Но для этого мало что делается практически. Как отмечалось в работе [Шерстков и др., 2009], и с тех пор почти ничего не изменилось, «промысловый потенциал Белого моря значительно выше существующего уровня, и более полное освоение рыбных запасов моря возможно при расширении географии и сроков судового тралового лова беломорской сельди, возобновлении весеннего специализированного промысла корюшки, организации ресурсных исследований и последующего возобновления промысла камбаловых, пинагора и прочих промысловых рыб». Проблемы рыболовства в регионе во многом связаны с различного рода административными барьерами и несовершенством рыбохозяйственного законодательства. Поэтому актуальной является проблема поиска путей повышения уровня жизни населения с развитием рыболовства и рыбоводства в Беломорье.

Для того чтобы всесторонне рассмотреть возможности повышения уровня жизни населения региона [Загородникова, 1998; Дружинин и др., 2018] с использованием рыболовства в условиях климатических изменений, рыночной экономики, антропогенных воздействий, загрязнения, эвтрофирования моря и др. факторов, влияющих на условия воспроизводства, численность рыб, а также условия проживания населения, с учетом размытости и нечеткости исходных данных, для описания такой сложной социо-эколого-экономической системы целесообразно применение когнитивного подхода [Акофф, Эмери, 1974; Паклин, 2003; Величковский, 2006]. Отметим, что опыт приложения когнитивных методов к задаче управления системой взаимодействия человеческого общества и водной экологической системы уже имеется [Меншуткин, Минина, 2017; Меншуткин и др., 2018].

Начиная с теории жизни рыб Ф. Баранова [см. Шибаев, 2015], оптимальное управление рыболовством трактовалось как нахождение таких режимов промысла, которые обеспечивали бы максимальный вылов при сохранении рыбных запасов. Но в настоящей работе целевая функция управления переключается с максимизации выловов на достижение максимально высокого уровня жизни населения [Курзев, Матвеев, 2018]. При этом сам критерий

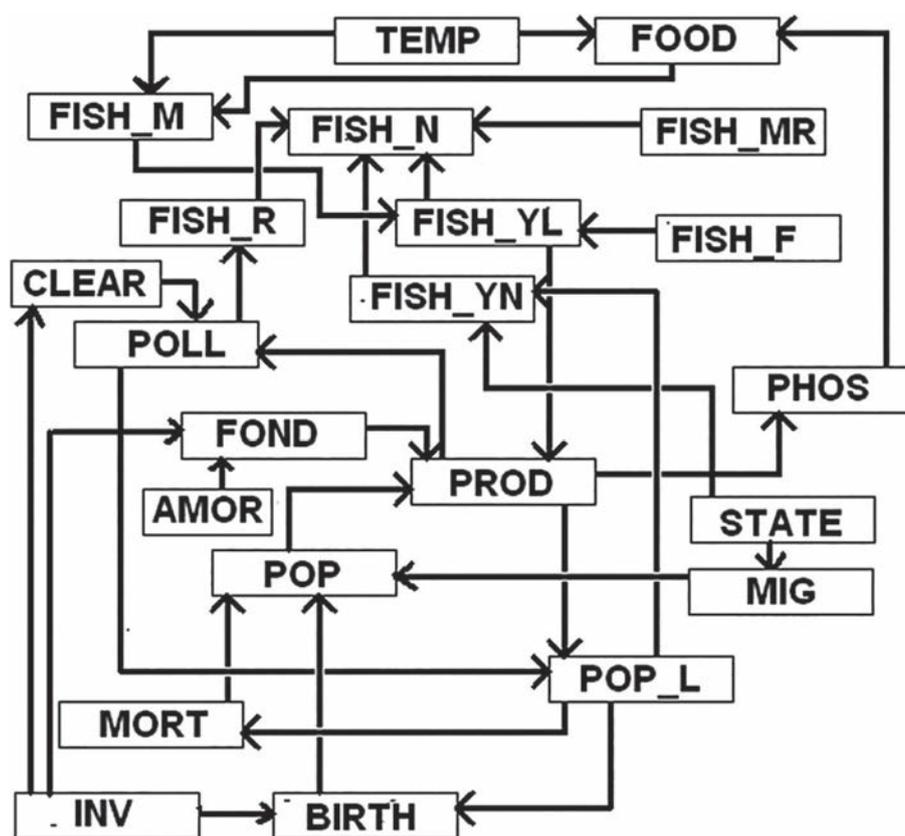


Рис. 1. Когнитивная карта модели повышения уровня жизни населения региона с использованием рыболовства:

TEMP – температура вод Белого моря; FOOD – кормовая база рыб; FISH\_M – темпы роста рыб; PHOS – фосфорная нагрузка; FISH\_N – численности рыб; FISH\_R – пополнение рыбной популяции; FISH\_MR – общая убыль (смертность), которая складывается из естественной смертности и промысловой убыли; FISH\_YL – легальный вылов, определяется FISH\_F – усилиями рыболовства; FISH\_YN – нелегальный вылов; STATE – социо-экономическая ситуация; PROD – валовой региональный продукт; POP – численность населения; FOND – фондовооруженность отрасли: орудия лова, состояние рыбопромыслового флота и предприятий по переработке рыбы; AMOR – величина сокращения фондов за счет амортизации; INV – величина увеличения фондов за счет инвестиций; CLEAR – интенсивность и качество работы очистных сооружений; BIRTH – прирост численности населения; MORT – смертность населения; MIG – величина миграции; POLL – загрязнение окружающей среды; POP\_L – уровень жизни населения

Fig. 1. Cognitive map of the model of improving the living standards of the region population using fisheries:

TEMP – temperature of the White Sea waters; FOOD – fish food supply; FISH\_M – fish growth rates; PHOS – phosphorous load; FISH\_N – fish number; FISH\_R – fish population replenishment; FISH\_MR – total decrease (mortality) as the sum of natural mortality and fishery; FISH\_YL – legal yield determined by FISH\_F – fishery; FISH\_YN – illegal yield; STATE – socio-economic state; PROD – gross regional product; POP – population; FOND – capital-labor ratio of the industry: fishing equipment, state of fishing fleet and fish processors; AMOR – resources decrease due to amortization; INV – resources increase due to investments; CLEAR – intensity and quality of waste treatment facilities; BIRTH – population growth; MORT – people's mortality; MIG – migration; POLL – environmental pollution; POP\_L – living standards of the population

оптимальности управления – уровень жизни населения – выражается более чем десятком различных параметров. Кроме валового продукта на душу населения это и уровень преступности, продолжительность жизни людей, состояние окружающей среды, коэффициент Джинни (показатель неравенства доходов) и др.

При таком критерии для создания когнитивной модели предложено использовать концептуальное моделирование [Лакофф, 1996] и математический аппарат непрерывной или размытой логики [Круглов и др., 2001]. Блок-схема, или когнитивная карта модели социо-эколого-экономической системы представлена на рис. 1.

## Описание модели

В разработанной нами ранее когнитивной модели социо-эколого-экономической системы Беломорья [Меншуткин и др., 2018] было показано, что в качестве основного параметра, отражающего экономическую деятельность на водосборе, выступает валовой региональный продукт (ВРП), формирование которого зависит от ресурсов рабочей силы и производственных фондов, включая орудия лова, состояние рыбопромыслового флота и предприятий по переработке рыбы. В указанной выше работе представлена динамика населения Беломорья, состояние окружающей среды, изменений климата и другие параметры системы. Загрязнение является обратно пропорциональным интенсивности и качеству работы очистных сооружений. Известно, что объемы поступления биогенов (соединений азота и фосфора) пропорциональны ВРП.

На рис. 1 показано, что вершины этой блок-схемы (когнитивного графа) соответствуют концептам (переменным) модели, состояние которых с течением времени может изменяться в диапазоне от 0 до 1 с шагом 0,1. Дуги графа соответствуют информационным воздействиям одного концепта на другие. Поскольку модель нацелена на изучение качественных характеристик динамики сложной социо-эколого-экономической системы, то в качестве начального этапа при моделировании рассматривали не все сообщество рыб Белого моря, а ограничились наиболее важной с точки зрения промышленного вылова популяцией, прототипом которой служит популяция сельди или наваги – арктической рыбы. Кормовая база, уловы, темпы роста популяций этих рыб, влияние изменений климата, абиотических факторов хорошо изучены [Стасенков, 2012, 2017]. Уловы пелагических и донных рыб подвержены значительной временной изменчивости, которая связана с влиянием природных процессов и антропогенных факторов. Однако, как представлено в работах [Дроздов и др., 2012; Стасенков, 2017], корректно установить объемы уловов промысловых рыб Белого моря представляется затруднительным из-за недостатка продолжительных рядов статистически достоверных данных о них. Величины уловов основных промысловых рыб Белого моря демонстрируют статистическую связь с динамикой показателей атмосферной циркуляции, которые, в свою очередь, оказывают определяющее влияние на температурный режим региона [Дроздов и др., 2012]. При потеплении климата в регионе с запаздыванием от 2 до 4–5 лет от-

мечается увеличение уловов бореальных рыб, и прежде всего сельдевых. На воспроизводстве и уловах промысловых холодолюбивых арктических рыб, среди которых навага и мойва, потепление сказывается неблагоприятно. Из абиотических факторов наибольшее влияние имеет температура воды. Влияние температурного режима на рост рыб может осуществляться через варьирование кормовой базы или доступности корма, изменение продолжительности нагула [Стасенков, 2017]. Также под влиянием колебаний температурного режима изменяется скорость обмена веществ.

Промысловые биологические ресурсы Белого моря при определенных условиях способны не только обеспечить потребности местного населения, но и улучшить социально-экономические условия всех регионов Беломорья [Иконникова и др., 2015]. Последнее утверждение оценим по данным когнитивного моделирования.

Временной шаг модели принят равным одному году, и все содержание моделирующего алгоритма сводится, по существу, к определению состояния системы в год  $t$  по состоянию в предыдущем году ( $t - 1$ ) с учетом изменения внешних воздействий на систему (как климатических, так и экономико-социальных).

Перейдем к описанию концептов модели и связей между ними (рис. 1). Температура поверхностных вод Белого моря в летнее время (TEMP) определяется тенденциями потепления климата, что существенно влияет как на кормовую базу рыб (FOOD), так и непосредственно на темп роста самой рыбы (FISH\_M). Поскольку, как говорилось выше, концепты модели могут принимать значения от 0 до 1, для описания связей между концептами целесообразно применить математический аппарат размытой или нечеткой логики [Паклин, 2003]. Функции дизъюнкции ( $\vee$ ), конъюнкции ( $\wedge$ ) и отрицания ( $\neg$ ) определяются как:

$$\begin{aligned}X \wedge Y &= X \times Y, \\X \vee Y &= X + Y - X \times Y, \\ \neg X &= 1 - X.\end{aligned}$$

Кормовая база рыб имеет тенденцию к увеличению при росте температуры воды и повышению первичной продукции моря, которая связана с фосфорной нагрузкой (PHOS).

При этом учитывается инерционность изменений трофической сети моря и поэтому берется прошлогоднее ( $t - 1$ ) значение нагрузки [Стасенков, 2012].

Кормовая база рыб определялась следующим образом:

$$FOOD(t) = TEMP(t) \vee PHOS(t - 1).$$

При оценке средней массы особи рыбы учитывается не только положительное влияние температуры и корма, но и отрицательное влияние численности рыб – потребителей корма (FISH\_N):

$$FISH\_M(t) = (TEMP(t) \vee PHOS(t - 1)) \vee FISH\_N(t - 1).$$

На численность рыб в текущем году оказывают положительное влияние их численность в предыдущем году и пополнение (FISH\_R (t)), а отрицательное – общая убыль (смертность), которая складывается из естественной смертности (FISH\_MR) и промысловой убыли. При этом промысловая смертность подразделяется на легальную и нелегальную (браконьерскую). Легальный вылов (FISH\_YL) определяется усилиями рыболовства (FISH\_F), которые учитываются официальной рыболовной статистикой. Нелегальный вылов (FISH\_YN) обусловлен социо-экономической ситуацией (STATE), и его величина не включается в валовой региональный продукт (PROD) в отличие от улова легального. Величина концепта STATE (t) в зависимости от времени определяется коренными изменениями в экономическом укладе страны. При определении легального и нелегального вылова учитывается изменение средней массы особи к моменту улова (FISH\_M (t)):

$$\begin{aligned} FISH\_YL(t) &= FISH\_N(t - 1) \vee FISH\_F(t), \\ FISH\_YN(t) &= FISH\_N(t - 1) \vee STATE(t), \\ FISH\_N(t) &= FISH\_N(t - 1) \vee FISH\_R(t), \\ FISH\_N(t) &= FISH\_N(t) \wedge FISH\_YL(t) \wedge FISH\_YN(t). \end{aligned}$$

Формирование регионального валового продукта согласно функции Кобба – Дугласа [[http://www.economicportal.ru/ponyatiya-all/cobb-douglas\\_function.html](http://www.economicportal.ru/ponyatiya-all/cobb-douglas_function.html)] зависит от ресурсов рабочей силы и производственных фондов. Первый фактор предполагается в модели пропорциональным численности населения (POP), а второй включает в себя орудия лова, состояние рыбопромыслового флота и предприятий по переработке рыбы (FOND). Величина фондов сокращается за счет амортизации (AMOR), но может увеличиваться за счет инвестиций (INV). Таким образом:

$$\begin{aligned} FOND(t) &= FOND(t - 1) \wedge AMOR, \\ FOND(t) &= FOND(t) \vee INV(t). \end{aligned}$$

Амортизация предполагается в модели величиной, не зависящей от времени. Инвестиции являются управляющим фактором для всей системы:

$$PROD(t) = FOND(t - 1) \wedge POP(t - 1).$$

Загрязнение окружающей среды, и в частности акватории Белого моря и нерестилищ

рыбы, полагается прямо пропорциональным ВРП и обратно пропорциональным интенсивности и качеству работы очистных сооружений (CLEAR), поскольку чем больше очистка воды, тем меньше загрязнение вод:

$$POLL(t) = PROD(t) \wedge CLEAR(t).$$

Эффективность очистки является управляющим фактором, требующим дополнительных инвестиций. Упомянутая выше величина сброса соединений азота и фосфора (PHOS) также полагается пропорциональной валовому региональному продукту.

Численность населения (POP) возрастает за счет естественного прироста (BIRTH) и сокращается за счет естественной смертности (MORT) и миграции (MIG). Значимой величиной для всей системы является уровень жизни населения (POP\_L), который служит целевой функцией в процессе оптимального управления всей моделируемой системой [Власов, Шапиро, 2005; Гузинаров и др., 2013]. В разрабатываемой модели предполагается, что уровень жизни населения определяется продукцией, приходящейся на душу населения, и низким уровнем загрязнения окружающей среды (POLL):

$$POP\_L(t) = PROD(t) \wedge \neg POP(t) \wedge \neg POLL(t).$$

Отток населения из региона Беломорья (MIG) полагается пропорциональным ухудшению уровня жизни населения (POP\_L). Прирост населения (BIRTH) может быть частично увеличен дополнительными инвестициями. Естественная смертность (MORT) полагается пропорциональной уровню загрязнения окружающей среды и уровню жизни населения.

## Исследование модели

Исследование модели начнем с попытки воспроизведения в модели реальной ситуации.

На рисунках 2–5 представлены результаты расчетов динамики системы с учетом изменений социально-экономической ситуации (STATE).

На рис. 2 представлена ситуация, при которой происходит почти полное исчезновение к 2030 году наваги как объекта промысла, при условии, что социально-экономическая ситуация будет соответствовать началу 2000 года; это показывает, что модель не противоречит фактическим данным. Несмотря на попытки регулирования (ограничения) вылова рыб в определенные периоды года для восстановления рыбных запасов, оказывается, что основную роль в их подрыве играет нелегальный браконьерский промысел [Стасенков, 2017]. Ме-

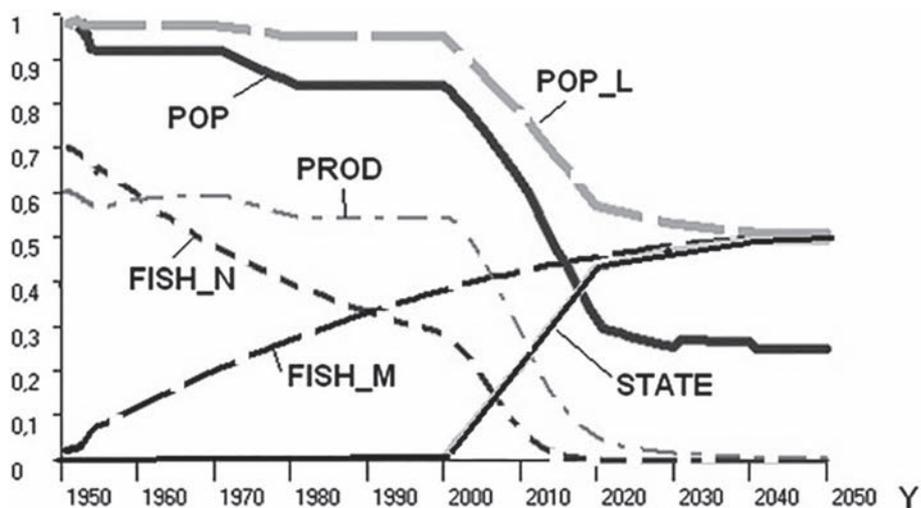


Рис. 2. Динамика системы с учетом изменений социально-экономической ситуации (STATE)

Fig. 2. System dynamics with regard to socio-economic changes (STATE)

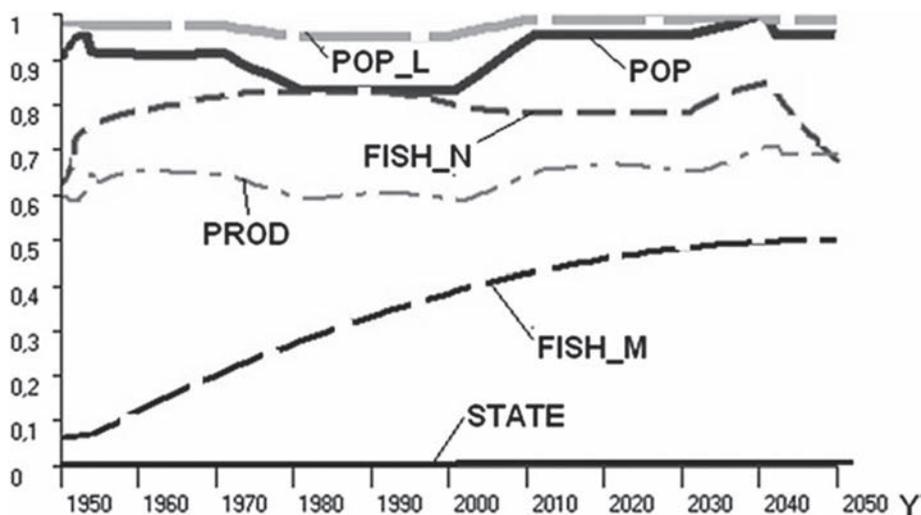


Рис. 3. Динамика системы при условии возможной (в рамках модели) неизменности социально-экономической ситуации (STATE)

Fig. 3. System dynamics in case of possible (within the framework of the model) invariability of the socio-economic state (STATE)

нее резко, чем популяции рыб, но вполне существенно снижается и численность населения, в основном за счет миграции из региона в условиях ухудшения социально-экономической ситуации. К 2040 году численность населения стабилизируется на более низком уровне по сравнению с 2000 г., причем уровень жизни существенно снижается по сравнению с исходным, в основном за счет сокращения валового регионального продукта, в котором исчезает вклад промышленного рыболовства. Для сравнения на рис. 3 представлена гипотетическая ситуация, при которой никаких социально-экономических изменений вообще не происходит

и все параметры (за исключением климатических) остаются на уровне 1970–1980 годов. Это подтверждает, что модель правильно воспроизводит известную фактическую ситуацию.

На рис. 4 представлена модель, в которой изменения социально-экономической ситуации происходят за 20 лет (1990–2010 гг.). В этом случае, в отличие от исходного варианта (рис. 2), изучаемая система демонстрирует способность к восстановлению исходного состояния. Наиболее резко изменению подверглась численность населения из-за массовой миграции, связанной с ухудшением условий жизни. Однако к 2030 году численность

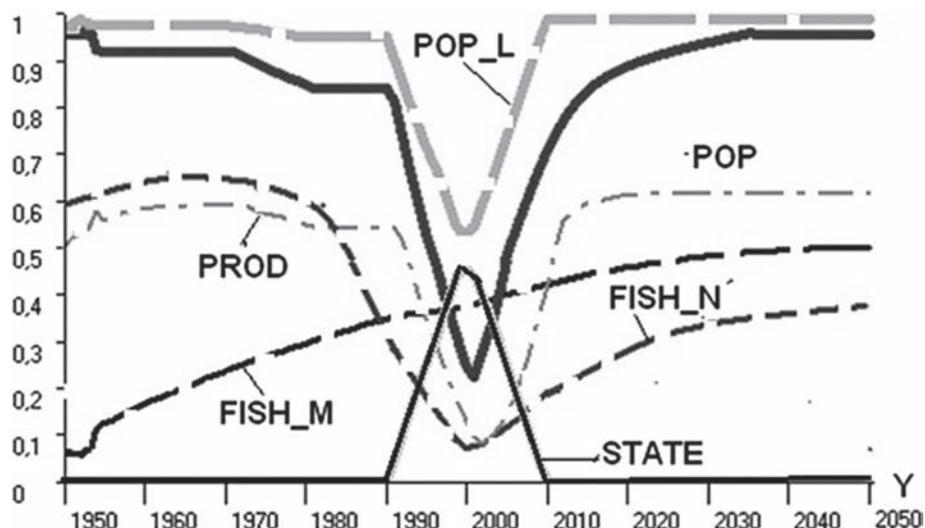


Рис. 4. Динамика системы при условии кратковременного изменения социально-экономической ситуации (STATE)

Fig. 4. System dynamics in case of short-term change of the socio-economic state (STATE)

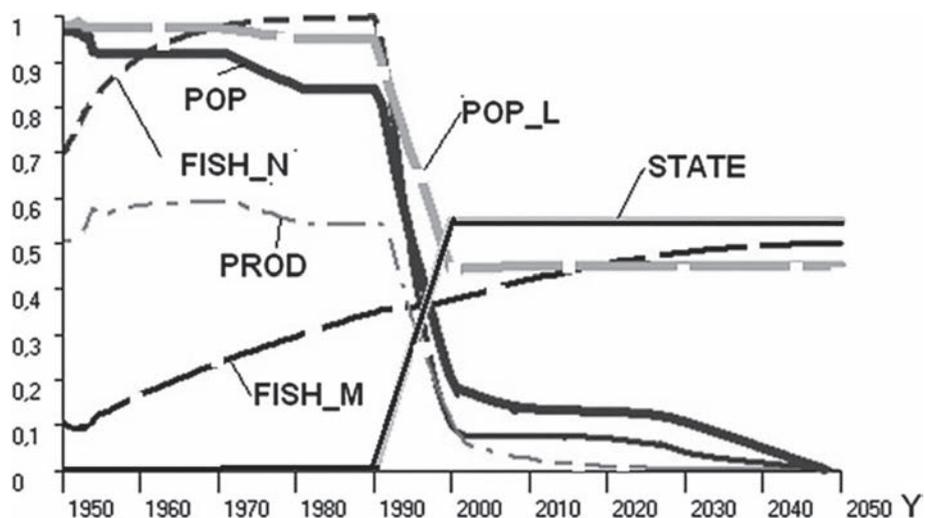


Рис. 5. Динамика системы при условии длительного изменения социально-экономической ситуации (за 10 лет от нуля до 0,55) (STATE) и резкого сокращения инвестиций (INV) после 1991 г.

Fig. 5. System dynamics in case of long-term change of the socio-economic state (during 10 years from 0 to 0,55) (STATE) and dramatic decrease of investments (INV) after 1991

населения при заданных в модели условиях может возвратиться к прежнему уровню. Аналогичные изменения претерпевает и численность популяции рыбы, однако популяция рыб оказалась несколько более инерционной, чем в данном случае человеческая популяция, поскольку для жизнедеятельности людей требуется больше условий.

Рассмотрим, наконец, вариант катастрофического развития событий (рис. 5). Для гипотетического почти полного уничтожения как рыб-

ной, так и человеческой популяции в регионе потребовалось не так уж много условий. Для этого надо было провести социально-экономические изменения в более сжатые сроки – менее 10 лет вместо 20 лет в варианте, представленном на рис. 2, и несколько повысить их интенсивность. Для условий рассматриваемого модельного эксперимента уровень жизни населения хотя и снижается, но до нуля не доходит даже при практически полном отсутствии населения.

## Выводы

Выполненные расчеты на когнитивной модели эколого-социо-экономической системы Беломорья показали, что уровень жизни виртуального населения определялся в модели продукцией, приходящейся на душу населения, и минимальным (в понимании когнитивного подхода, т. е. близким к нулю) уровнем загрязнения окружающей среды. Отметим, что в когнитивной модели рассматриваются только тенденции нормированных значений, а не реальные величины. Таким образом:

– воспроизведение в модели реальной экологической и экономической ситуации [Меншуткин и др., 2018], которая сложилась к 2000 г. и не менялась в Беломорье до 2010 г., приводит к тому, что к 2030 г. навага как объект промысла практически исчезает;

– если воспроизвести ситуацию, при которой никаких социально-экономических изменений не происходит и все параметры, за исключением климатических, остаются на уровне 1970–1980-х годов, то при таких условиях система сохраняется в стабильном состоянии. Это подтверждает, что модель правильно воспроизводит известную фактическую ситуацию. Очевидно, для сохранения окружающей среды необходимо предусматривать дополнительные инвестиции в развитие систем очистки от загрязнения;

– в том случае, если изменения социально-экономической ситуации носят средний по времени характер, около 20 лет (1990–2010 гг.), изучаемая система демонстрирует способность к восстановлению исходного состояния и к 2030 году численность населения может возвратиться к прежнему, дореформенному (до 1991 г.) уровню. Аналогичные изменения претерпевает и численность популяции рыбы (наваги). При этом численность популяции рыб оказывается более инерционной, чем численность населения, которая зависит от существенно большего числа факторов;

– наконец, возможен «катастрофический» вариант с практически полным уничтожением как рыб (в данном случае наваги), так и человеческой популяции в регионе, в том случае, если бы социально-экономические преобразования (реформы) в регионе были проведены в более сжатые сроки, т. е. менее чем за 20 лет.

Отметим, что основной смысл настоящего исследования заключается вовсе не в предостерегающих или многообещающих прогнозах развития рыбного хозяйства в Белом море и демографических изменений в Беломорье, а в том, что с помощью когнитивного подхода

показана возможность рассмотреть сложную систему с учетом разных сценариев экономики, состояния окружающей среды моря и водосбора, изменений климата и других параметров.

*Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН) и Института региональной экономики РАН (АААА-А19-119-021390164-1).*

*Авторы благодарят А. П. Георгиева за помощь при подготовке данных о вылове рыбы, использованных в моделях, а также признательны рецензентам работы за ценные замечания, которые помогли улучшить статью.*

## Литература

Акофф Р., Эмери Ф. О целеустремленных системах / Пер. с англ. Под ред. И. А. Ушакова. М.: Сов. радио, 1974. 272 с.

Баранов Ф. И. К вопросу о биологических основаниях рыбного хозяйства // Изв. Отдела рыбоводства и научно-промысл. исслед. 1918. Т. 1, вып. 2. С. 84–128.

Величковский Б. М. Когнитивная наука. Основы психологии познания. В 2-х т. М.: Академия, 2006. 432 с.

Власов М. П., Шапиро П. Д. Моделирование экономических процессов. Ростов-на-Дону: Феникс, 2005. 406 с.

Гузинаров М. Б., Ильясов Б. Г., Вакиева Е. Ш., Герасимова И. Б. Когнитивная модель формирования показателя уровня жизни // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 2(53). С. 216–226.

Дроздов В. В., Смирнов Н. П., Косенко А. В. Многолетняя динамика уловов промысловых рыб Белого моря в зависимости от климатических колебаний и состояния рыбопромысловой отрасли // Уч. зап. РГГМУ. 2012. № 27. С. 148–164.

Дружинин П. В., Филатов Н. Н., Морошкина М. В., Дерусова О. В., Поташева О. В. Моделирование и пространственный анализ эколого-экономического состояния водосбора Белого моря // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2018. Т. 24, № 1. С. 297–309.

Загородникова Т. А. Об уровне жизни населения // Вопросы статистики. 1998. № 6. С. 14–17.

Иконникова О. В., Зыкова Н. В., Гарина Я. Н. Проблемы развития рыбопереработки в промысловых районах Арктики // Сельское, лесное и водное хозяйство. 2015. № 4(43). С. 15–18.

Круглов В. В., Дли М. И., Голунов Р. Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. М.: Физматлит, 2001. 201 с.

Курзев В. А., Матвеев В. Д. Экономический рост. СПб.: Питер, 2018. 608 с.

Лакофф Дж. Когнитивное моделирование // Язык и интеллект / Под ред. М. А. Оборина. М.: Прогресс, 1996. С. 143–185.

Меншуткин В. В., Филатов Н. Н., Дружинин П. В. Состояние и прогнозирование социо-эколого-экономической системы водосбора Белого моря с использованием когнитивного моделирования // Арктика. Экология и экономика. 2018. № 2(30). С. 4–17. doi: 10.25283/2223-4594-2018-2-17

Меншуткин В. В., Минина Т. Р. Когнитивная модель взаимодействия человеческого общества с экологической системой водоема // Региональная экономика и развитие территорий: Сб. науч. статей ИПРЭ РАН. СПб., 2017. Т. 1(11). С. 160–166.

Меншуткин В. В. Исследование динамики популяций промысловых рыб и водных экосистем с помощью методов искусственного интеллекта. СПб.: Нестор-История, 2017. 120 с.

Паклин Н. Б. Нечетко-когнитивный подход к управлению динамическими системами // Искусственный интеллект. 2003. № 4. С. 342–348.

Стасенков В. А. Навага // Биологические ресурсы Белого моря: изучение и использование. СПб.: ЗИН РАН, 2012. С. 164–173.

Стасенков В. А. Многолетняя динамика биологических показателей наваги *Eleginus nawaga* (Walbaum, 1792) Белого моря в связи с изменениями

температурного режима водоема // Вестник Мурман. гос. техн. ун-та. 2017. Т. 20, № 2. С. 370–380.

Стерлигова О. П., Ильмаст Н. В., Кучко Я. А. и др. Состояние пресноводных водоемов Карелии с товарным выращиванием радужной форели в садках. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. 27 с.

Фомин А. В. Есть ли будущее у рыбной отрасли // Состояние и перспективы развития рыбной промышленности Северного бассейна в меняющихся условиях: Сб. материалов V науч.-практ. конф. (Мурманск, 19 января 2016 г.). Мурманск: Изд-во МГТУ, 2016. 229 с.

Шерстков А. С., Фролов С. Б., Шерстков В. С. Проблемы рыболовства в Белом море и пути их решения // Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера: Материалы XXVIII Междунар. конф. 5–8 октября 2009 г. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. С. 637–642.

Шибяев С. В. Формальная теория жизни рыб Ф. И. Баранова и ее значение в развитии рыбохозяйственной науки // Тр. ВНИИРО. 2015. Т. 157. С. 127–142.

Поступила в редакцию 13.08.2019

## References

Ackoff R., Emeri F. О tselestremlyennykh sistemakh [On purposeful systems]. Transl. from Eng. Ed. I. A. Ushakov. Moscow: Sov. radio, 1974. 272 p.

Baranov F. I. К вопросу о biologicheskikh osnovaniyakh rybnogo khozyaistva [On the question of the biological bases of fishery]. *Izv. Otd. rybovodstva i nauchno-promysl. issled.* [Proceed. Dep. Fishery Sci. Ind. Res.]. 1918. Vol. 1, iss. 2. P. 84–128.

Drozhdov V. V., Smirnov N. P., Kosenko A. V. Многолетняя динамика уловов промысловых рыб Белого моря в зависимости от климатических колебаний и состоянии рыбной промысловой отрасли [Long-term variability of stocks of the food fishes in the White Sea under the influence of climatic changes and fishery branch activity]. *Uch. zap. RGGMU* [Proceed. RSHU]. 2012. No. 27. P. 148–164.

Druzhinin P. V., Filatov N. N., Moroshkina M. V., Derusova O. V., Potasheva O. V. Modelirovanie i prostanstvennyi analiz ekologo-ekonomicheskogo sostoyaniya vodosbora Belogo morya [Modeling and spatial analysis of ecological-economic state of the White Sea catchment]. *InterKarto. InterGIS* [InterKarto. InterGIS]. 2018. Vol. 24, no. 1. P. 297–309.

Fomin A. V. Est' li budushchee u rybnoi otrasli [Does fishing industry have future?]. *Sostoyanie i perspektivy razv. rybnoi promyshlennosti Severnogo bass. v menyayushchikhsya usloviyakh*: Sb. mat. V nauch.-prakt. conf. (Murmansk, 19 yanvarya 2016 g.) [State and prospects of fishing industry development in the Northern basin under changing conditions: Proceed. V sci.-pract. conf. (Murmansk, Jan. 19, 2016)]. Murmansk: MGТУ, 2016. 229 p.

Guzinarov M. B., Il'yasov B. G., Vakieva E. Sh., Gerasimova I. B. Kognitivnaya model' formirovaniya pokazatelya urovnya zhizni [The cognitive model of living standards indicator formation]. *Vestnik UGATU*

[Proceed. Ufa St. Aviation Tech. Univ.]. 2013. Vol. 17, no. 2(53). P. 216–226.

Ikonnikova O. V., Zykova N. V., Garina Ya. N. Problemy razvitiya ryboprerabotki v promyslovyykh raionakh Arktiki [Problems of fish processing development in the Arctic fishing grounds]. *Sel'skoe, lesnoe i vodnoe khozyaistvo* [Agriculture, forestry, and water economy]. 2015. No. 4(43). P. 15–18.

Kruglov V. V., Dli M. I., Golunov R. Yu. Nechetkaya logika i iskusstvennyye neironnyye seti [Fuzzy logic and artificial neural networks]. Moscow: Fizmatlit, 2001. 201 p.

Kurzenev V. A., Matveenko V. D. Ekonomicheskii rost [Economic growth]. St. Petersburg: Piter, 2018. 608 p.

Lakoff G. Kognitivnoe modelirovanie [Cognitive models]. *Yazyk i intellekt* [Language and intellect]. Ed. M. A. Oborin. Moscow: Progress, 1996. P. 143–185.

Menshutkin V. V., Filatov N. N., Druzhinin P. V. Sostoyanie i prognozirovanie sotsio-ekologo-ekonomicheskoi sistemy vodosbora Belogo morya s ispol'zovaniem kognitivnogo modelirovaniya [The current state and forecasting of the socio-ecological-economic system of the White Sea watershed with use of cognitive simulation]. *Arktika. Ecol. i ekonomika* [Arctic: Ecol. and Economy]. 2018. No. 2(30). P. 4–17. doi: 10.25283/2223-4594-2018-2-17

Menshutkin V. V., Minina T. R. Kognitivnaya model' vzaimodeistviya chelovecheskogo obshchestva s ekologicheskoi sistemoi vodoema [The cognitive model of the interaction between society and ecological system of a water body]. *Regional'naya ekonomika i razvitie territorii*: Sb. nauch. statei IPRE RAN [Regional economics and area development: Proceed. IREP RAS]. St. Petersburg, 2017. Vol. 1(11). P. 160–166.

Menshutkin V. V. Issledovanie dinamiki populyatsii promyslovyykh ryb i vodnykh ekosistem s pomoshch'yu

методов искусственного интеллекта [Study of commercial fish population and water ecosystems dynamics with the use of artificial intelligence methods]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2017. 120 p.

*Paklin N. B.* Nechetko-kognitivnyi podkhod k upravleniyu dinamicheskimi sistemami [Fuzzy cognitive approach to dynamic systems management]. *Iskusstvennyi intellect* [Artificial Intelligence]. 2003. No. 4. P. 342–348.

*Sherstkov A. S., Frolov S. B., Sherstkov V. S.* Problemy rybolovstva v Belom more i puti ikh resheniya [Problems of fishery in the White Sea and ways of their solution]. *Biol. resursy Belogo morya i vnutr. vodoemov Evropeiskogo Severa: Mat. XXVIII Mezhdunar. konf. (5–8 oktyabrya 2009 g.)* [Biol. resources of the White Sea and inland waters of the European North: Proceed. XXVIII int. conf. (Oct. 5–8, 2009)]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2009. P. 637–642.

*Shibaev S. V.* Formal'naya teoriya zhizni ryb F. I. Baranova i ee znachenie v razvitii rybokhozyaistvennoi nauki [The formal theory of fish life developed by F. I. Baranov and its role in the fishery research]. *Tr. VNIRO* [Proceed. Russ. Fed. Research Inst. of Fisheries and Oceanography]. 2015. Vol. 157. P. 127–142.

*Stasenkov V. A.* Navaga [The navaga]. *Biol. resursy Belogo morya: izuchenie i ispol'zovanie* [Biol. resources of the White Sea: study and use]. St. Petersburg: ZIN RAN, 2012. P. 164–173.

*Stasenkov V. A.* Mnogoletnyaya dinamika biologicheskikh pokazatelei navagi *Eleginus nawaga* (Walbaum, 1792) Belogo morya v svyazi s izmeneniyami temperaturnogo rezhima vodoema [Long-term dynamics of biological indicators of the navaga *Eleginus nawaga* (Walbaum, 1792) of the White Sea in relation to changes of the reservoir temperature regime]. *Vestnik Murm. gos. tekhn. un-ta* [Vestnik of MSTU]. 2017. Vol. 20, no. 2. P. 370–380.

*Sterligova O. P., Il'mast N. V., Kuchko Ya. A. et al.* Sostoyanie presnovodnykh vodoemov Karelii s tovarnym vyrashchivaniem raduzhnoi foreli v sadkakh [The current state of commercial growth of rainbow trout in fishponds in freshwater water bodies of Karelia]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2018. 27 p.

*Velichkovskii B. M.* Kognitivnaya nauka. Osnovy psikhologii poznaniya. V 2-kh t. [Cognitive science. Fundamentals of cognitive psychology. In 2 vol.]. Moscow: Akademiya, 2006. 432 p.

*Vlasov M. P., Shapiro P. D.* Modelirovanie ekonomicheskikh protsessov [Simulation of economic processes]. Rostov-on-Don: Feniks, 2005. 406 p.

*Zagorodnikova T. A.* Ob urovne zhizni naseleniya [On living standards]. *Voprosy statistiki* [Bull. Statistics]. 1998. No. 6. P. 14–17.

Received August 13, 2019

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### **Меншуткин Владимир Васильевич**

главный научный сотрудник, д. б. н., проф.  
Институт проблем региональной экономики РАН  
ул. Серпуховская, 38, Санкт-Петербург, Россия, 190013  
эл. почта: menshutkina.n@gmail.com

### **Филатов Николай Николаевич**

директор ИВПС КарНЦ РАН, чл.-корр. РАН,  
д. г. н., проф.  
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185030  
эл. почта: nfilatov@rambler.ru

## CONTRIBUTORS:

### **Menshutkin, Vladimir**

Regional Economics Institute, Russian Academy of Sciences  
38 Serpukhovskaya St., 190013 St. Petersburg, Russia  
e-mail: menshutkina.n@gmail.com

### **Filatov, Nikolai**

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

## ХРОНИКА

### II МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ОЗЕРА ЕВРАЗИИ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ» (Казань, 19–24 мая 2019 г.)

В мае этого года в столице Республики Татарстан проводилась II Международная конференция «Озера Евразии: проблемы и пути их решения».

Важной задачей конференции являлась консолидация ученых стран Евразии и БРИКС для получения новых научных знаний, объединение усилий для решения практических проблем трансграничных озерно-речных систем, для обоснования возможного перераспределения водных ресурсов, рационального использования и охраны озер Евразии. Развитие проекта евразийской интеграции не может осуществляться без особого внимания к вопросам окружающей среды, и особенно к ее водным объектам. Для гармоничного процесса международного развития Евразии актуальным является изучение фундаментальных проблем и решение практических вопросов в тесном сотрудничестве ученых многих стран.

В работе конференции приняли участие 270 ученых, из них 5 членов Российской академии наук, 3 члена Академии наук Республики Татарстан, 40 докторов, 78 кандидатов наук, 20 молодых научных сотрудников, аспирантов и студентов, представлявших свыше 65 отечественных и зарубежных учреждений высшего образования, научных институтов и других организаций из 18 городов России и 8 иностранных государств (Франция, Эстония, Белоруссия, Финляндия, Польша, Таджикистан, Казахстан, Китай). Издан сборник трудов в 2-х томах общим объемом 733 стр., в который вошли 172

статьи. Материалы конференции представлены на сайте <http://www.ipen-anrt.ru/content/index.php/conference>.

Участников мероприятия приветствовали представители Министерства экологии и природных ресурсов Республики Татарстан, Академии наук Республики Татарстан и Российской академии наук, а также организаций, имеющих непосредственное отношение к охране окружающей среды.

Работа проводилась в рамках двух пленарных заседаний и четырех секций («Гидрология и гидрофизика», «Гидробиологические исследования», «Исследования качества воды и донных отложений», «Общие вопросы лимнологии»), а также заседаний круглых столов «Проблемы рационального использования и охраны водных объектов» и «Сотрудничество науки и образования при подготовке кадров для водной отрасли России».

На конференции «Озера Евразии: проблемы и пути их решения» в тесном сотрудничестве ученых обсуждались следующие основные проблемы:

- современное состояние и изменения экосистем озер Евразии;
- проблемы и пути решения совместного использования трансграничных озерно-речных систем;
- анализ внутривековых изменений гидрологического режима озер;
- перспективные методы моделирования экосистем для управления озерными экосистемами;



- совершенствование нормативно-правовой базы использования и охраны водных и биологических ресурсов озер;
- вселенцы и их роль в изменении экосистем озер;
- формирование химического состава воды и донных отложений озер и нормирование их качества;
- актуальные проблемы палеолимнологии;
- рекреационное использование озер и развитие экологического туризма.

В пленарных докладах были заслушаны сообщения о проблемах мониторинга, оценки состояния и прогноза изменения экосистем озер Евразии под влиянием природных и антропогенных факторов. Отмечено, что изменения озерного фонда РФ происходили в двух основных направлениях: возрастало количество создаваемых искусственных водоемов, в то же время происходило постепенное сокращение фонда естественных водоемов, прежде всего в наиболее освоенных районах страны. Тен-





денция снижения фонда естественных водоемов в наиболее освоенных частях страны носит пока локальный характер, однако она может быть усилена климатическими изменениями. Потепление климата несет негативные последствия для гидрологического режима водоемов: во многих озерах отмечается падение уровня воды, после сильной засухи 2010 г. значительное число озер потеряли свою водную поверхность.

Особое внимание в выступлениях было уделено характеристике экологического состояния каскада волжских водохранилищ в связи с реализацией федерального проекта «Оздоровление Волги». В частности, обсуждались проблемы динамики трофического статуса водных экосистем волжского бассейна, вклада диффузных источников загрязнения в величину биогенной нагрузки на поверхностные водные объекты. 20 мая 2019 г. участники конференции отметили День Волги, обсудив актуальные направления научного обеспечения природоохранной деятельности в бассейне р. Волги, а также необходимость широкого общественного обсуждения экологических проблем и информирования населения о результатах НИР, проводимых научными и образовательными организациями, расположенными на территории волжского бассейна.

Значительная часть прозвучавших на конференции докладов была посвящена проблемам мониторинга озер. Отмечалось, что состав и размещение постов государственной гидрологической сети Росгидромета на озе-

рах РФ не в полной мере соответствует географическому распределению озерных районов. В частности, отсутствуют наблюдения на озерах Северного Кавказа, северо-востока ЕТР и северо-востока АТР, Средней Сибири и др. Нет наблюдений на фоновых озерах, фактически не испытывающих антропогенной нагрузки. Большая часть водных объектов, находящихся на территории отдельных субъектов РФ, не поставлены на учет в Государственный водный кадастр, а сведения по целому ряду объектов полностью отсутствуют, что не позволяет в должной мере решать вопросы управления и контроля за их современным состоянием.

В этой связи участники конференции обращаются в адрес Росгидромета с предложением не допускать дальнейшего сокращения наблюдательной сети на озерах. Кроме того, участники конференции считают необходимым обратиться в природоохранные и исполнительные органы власти субъектов РФ с просьбой об организации системных наблюдений на внутренних водоемах с передачей данных в Государственный водный кадастр.

В числе обсуждаемых на конференции проблем рассматривалась и проблема доступности данных, получаемых по результатам мониторинга озер, осуществляемого в рамках выделенных полномочий различными министерствами и ведомствами. Необходимо принятие постановления на федеральном уровне, регламентирующего предоставление данных государственного мониторинга озер научным



и научно-образовательным организациям, а также информирования населения о качестве поверхностных вод, на безвозмездной основе.

Учитывая важность сохранения экосистем уникальных водных объектов, необходимо активизировать территориальную практику включения озер, имеющих высокое природоохранное и научное значение, в систему особо охраняемых природных территорий местного, регионального и федерального уровня.

Также обсуждались проблемы, связанные с осуществлением государственного мониторинга водных объектов в части наблюдений за состоянием дна, берегов, состоянием и режимом использования водоохранных зон и изменениями морфометрических особенностей водных объектов или их частей. Отмечалось, что нормативно-методическая база и практические результаты наблюдений за морфометрическими характеристиками, состоянием и режимом использования водоохранных зон не соответствуют поставленным задачам, что влечет за собой получение недостоверных результатов мониторинга и невозможность принятия необходимых управленческих решений по использованию и охране водных объектов. Предложены основные направления практического выхода из сложившейся ситуации.

Участники конференции обращают внимание на необходимость совершенствования водного законодательства РФ в части обеспечения эффективного управления озерами, их охраны и использования. Следует рассмотреть вопрос о полном запрете строительства и иных

видов хозяйственной деятельности, нарушающей гидрологический режим, в водоохранных зонах озер, не имеющих подземного питания.

Среди положительных моментов конференции следует отметить внимание к вопросам подготовки новых кадров, которые рассматривались на заседании круглого стола «Сотрудничество науки и образования при подготовке кадров для водной отрасли России».

В области образования отмечалась необходимость рекомендовать соответствующим профильным высшим учебным заведениям разработать и ввести в учебные планы подготовки специалистов специализированную программу «лимнология», повысить качество образования в области гидрологии, гидрохимии, экологии, гидробиологии.

Участники мероприятия сходятся во мнении, что успешный опыт проведения конференции позволяет рассматривать ее как научную платформу для обсуждения наиболее важных фундаментальных и практических проблем многочисленных водных объектов Евразии с учетом их природного разнообразия, трансграничного значения, различных подходов к использованию, включая возможное перераспределение водных ресурсов, строительство гидротехнических сооружений в условиях изменения климата.

По рекомендации участников конференции оргкомитет подготовил резолюцию, которая направлена в ведущие научные организации России и стран Евразии, с предложением об организации конференций «Озера Евразии:

проблемы и пути их решения» с периодичностью раз в 2–3 года и проведении следующей в одном из регионов России или в одной из стран ЕАЭС, БРИКС.

Особое внимание на будущих конференциях необходимо обратить на такие направления научных исследований:

- озера и водохранилища как резервуары/источники пресной воды (включая трансграничные проблемы);
- озера как важный компонент глобального углеродного цикла, включая круговорот углекислого газа и источники метана;
- озера как «продукт» и регуляторы регионального климата;
- озера как объекты хозяйственной и рекреационной деятельности (биоресурсы, гидроэнергетика, водный транспорт, питьевое водоснабжение, аквакультура, рекреация);

– озера как важные источники информации о климате.

Организация конференции и издание ее материалов осуществлены Институтом проблем экологии и недропользования АН РТ при финансовой поддержке Министерства экологии и природных ресурсов РТ. (Участники конференции отметили прекрасную организацию мероприятия и гостеприимство организаторов, позволившие продуктивно провести заседания, научные экскурсии и наметить задачи следующих конференций «Озера Евразии». – *Прим. Н. Н. Филатова, отв. редактора серии).*

*Р. Р. Шагидуллин, чл.-корр. АН РТ, д. х. н.,  
сопредседатель оргкомитета конференции;  
Д. В. Иванов, к. б. н., секретарь  
оргкомитета конференции*

## **Международное сотрудничество в области науки и образования: ЗИМНИЕ ЛИМНОЛОГИЧЕСКИЕ КУРСЫ НА БИОЛОГИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ ЛАММИ**

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук (ИВПС КарНЦ РАН) в соответствии с планом проведения научных мероприятий 2019 года участвовал в организации и проведении Международных зимних лимнологических курсов (школа, практика и семинар) – The Winter Limnological school and workshop, которые успешно прошли на научной станции Ламми Университета г. Хельсинки (Финляндия) 11–15 марта 2019 года. Данное мероприятие является уникальной формой сотрудничества, направленной на подготовку талантливой молодежи к профессиональной научной деятельности с учетом международного аспекта.

### **История биологической станции Ламми Университета Хельсинки**

Биологическая станция Ламми основана в 1953 году на участке земли, выкупленной у церковной общины Ламми. Уникальная территория, на которой располагались озера с ручьями, участки лесных и болотных массивов, а также небольшие возвышенности, представляла огромный интерес в плане проведения комплексных научных исследований. Кроме того, расположение станции в 130 км от Хельсинки позволяло организовывать и проводить полевые работы студентов без особых транспортных затрат.

В 1970 году было закончено строительство новых зданий станции, при этом старая постройка – дом викария – сохранилась и до наших дней. Развитие инфраструктуры станции дало возможность проводить дополнительно к полевым курсам студентов круглогодичные стационарные наблюдения по крупным исследовательским проектам, финансируемым в том числе Академией наук Финляндии. Примером

таких работ является проект «Пяярви», целью которого было изучение структуры и функционирования экосистемы нетронутого бореального озера. Исследования по этому проекту стали началом развития водной экологии в качестве основного направления станции Ламми (<https://www.helsinki.fi/en/research-stations/lammi-biological-station>).

В настоящее время биологическая станция Ламми, принадлежащая факультету биологических наук и наук об окружающей среде Университета Хельсинки, стала международным научным центром. Ежегодно здесь осуществляются работы по 40 исследовательским проектам, проводятся 20 курсов и 70 семинаров по биологии и экологии. На биологической станции Ламми имеются все возможности как для осуществления исследовательских проектов (лаборатории, оборудование, транспорт, библиотека), так и для проведения различных научных мероприятий (размещение, лекционные залы, столовая).

### **Сотрудничество с Университетом Хельсинки**

Сотрудничество между ИВПС КарНЦ РАН и Университетом Хельсинки началось в 2006 году с целью проведения научных исследований в области гидрофизики и экологического просвещения согласно Программе Президиума РАН «Поддержка молодых ученых» по разделу «Поддержка деятельности институтов РАН по привлечению талантливой молодежи к научной работе». Сотрудничество осуществляется по отдельным проектам, в числе которых и участие в Зимних лимнологических курсах.

В 2019 году со стороны ИВПС КарНЦ оно традиционно проводилось как I этап VI Между-



Биологическая станция Ламми Университета г. Хельсинки  
Lammi Biological Station, University of Helsinki



народной молодежной лимнологической конференции и школы-практики (Water Resources: Research and Management (WRRM)), включенной в заявку 2019–2021 гг. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» (КарНЦ РАН) от ИВПС на сентябрь 2020 года.

В состав российской группы участников вместе с научными сотрудниками ИВПС КарНЦ РАН, ИВП РАН (Москва) входили студенты Петрозаводского и Сургутского государственных университетов, Российского государственного гидрометеорологического университета, международной магистерской программы «Комплексное изучение окружающей среды полярных регионов» (CORELIS – Cold Regions Environmental Landscapes Integrated Science) направления «Экология и природопользование» Санкт-Петербургского государственного университета.

Программа курсов была насыщенной и разнообразной. Кроме теоретических лекций и практических занятий были предусмотрены и экскурсии по территории станции, знакомство с ее историей, а также досуг участников,

включавший посещение сауны и беседы у камина.

Курсы проводились на английском языке. 40 студентов и молодых ученых из России, Китая, Германии и Финляндии имели возможность прослушать 10 лекций, провести полевые исследования на четырех озерах, сделать анализы проб воды и льда и подготовить, разбившись по желанию на группы, презентации по темам:

1. Газовые потоки из отстойников очистных сооружений.
2. Водоросли, обитающие во льду озера.
3. Влияние света на рост фитопланктона в зимних условиях.
4. Температура и химические характеристики воды в озере подо льдом.
5. Наблюдение за стратификацией подо льдом с использованием ROV (remotely operated underwater vehicle – телеуправляемый необитаемый подводный аппарат).
6. Структура и свойства льда.
7. Массово-тепловой баланс ледяного покрова.

В последний день работы курсов на семинаре, на котором каждая из групп представила отчет в виде презентации о проделанной работе, обработке данных и полученных результатах, стало очевидным огромное значение дан-



Лабораторный класс  
A laboratory class

ной формы международной деятельности для привлечения талантливой молодежи к научной работе как на сегодняшний день, так и в будущем. Организаторы курсов – коллеги из России и Финляндии договорились о продолжении сотрудничества.

ИВПС КарНЦ РАН и участники с российской стороны благодарят финских коллег и персонал станции за теплый прием, не только направленный на повышение уровня теоре-

тических и практических знаний участников, но включавший также беспокойство об их здоровье и комфортном пребывании.

*Т. И. Регеранд, к. б. н.,  
ученый секретарь ИВПС КарНЦ РАН;  
Л. Арвола, профессор, Биологическая  
станция Ламми, Университет Хельсинки;  
М. Леппяранта, профессор,  
Университет Хельсинки*

## **International scientific and teaching collaboration: Winter Limnology Course at the Lammi Biological Station**

### **Introduction**

The Northern Water Problems Institute (NWPI) of the Karelian Research Centre (KarRC), Russian Academy of Sciences (RAS), according to the plan

for scientific events in 2019, organized Winter Limnology Course together with the University of Helsinki (UH). The course was successfully carried out at the Lammi Biological Station (UH) in March 11–15, 2019. The course was a unique form of co-



Курс полевых работ  
Field work course



Лекция  
A lecture

operation aimed at preparing talented young people for professional scientific research in a truly international atmosphere.

### **History of Lammi Biological Station, University of Helsinki**

Lammi Biological Station (LBS) was founded in 1953 on the land purchased from the Lammi parish. The Lammi area with many lakes and streams, forest, and marshes as well as with small hills, has been of great interest for scientific research for more than a century, since the 1860s, when the Evo Forestry School was established 20 km north of LBS. The location of LBS is at 61.08°N, 25.02°E. It is 130 km north of Helsinki, enabling organization and implementation of fieldwork and field courses for students with only minor transportation costs. In 1970, when new buildings were completed, the infrastructure made it possible to conduct year-round research and education. Thereafter the first large research projects funded by the Academy of Finland and private foundations started. Later on, several research projects funded by the European Union have been carried out as well as many international field courses for students, meetings and workshops for scientists. One example of such a large project was the so-called

“Pääjärvi project”, which focused on the structure and functioning of the ecosystem of the nearby boreal lake Pääjärvi. Within this project, aquatic ecology was developing rapidly thanks to many young PhD students involved. Since then aquatic ecology became the main research topic for LBS (<https://www.helsinki.fi/en/research-stations/lammi-biological-station>). Nowadays the station belongs to the Faculty of Biological and Environmental Sciences at the University of Helsinki.

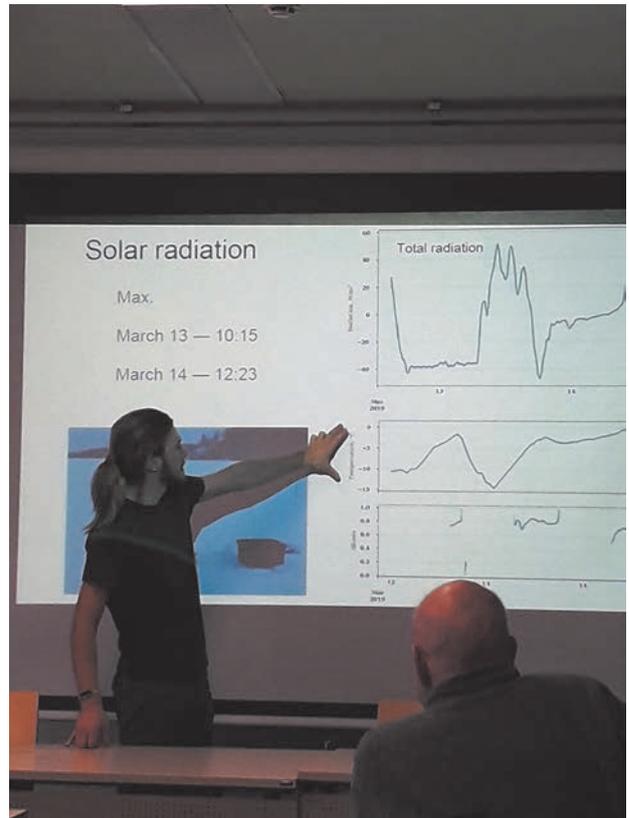
Today Lammi is an internationally well-known study area in environmental research with c. 40 research projects, 20 courses, and 70 seminars on biology, ecology and geosciences each year. There are excellent facilities for the implementation of both research projects (laboratories, equipment, transport, library) and various scientific events including seminars and conferences (updated accommodation and lecture room facilities with excellent catering services at its own canteen).

### **Collaboration with the University of Helsinki**

Cooperation between the Northern Water Problems Institute of KarRC RAS and the University of Helsinki started in 2006. Then, a 5-year memorandum was signed with the Department of Physics of the University of Helsinki. Presently, the valid memorandum is with the Institute of Atmospheric and Earth System Research of the University of Helsinki. The aim is to conduct research in the field of hydrophysics and hydrobiology and conduct environmental education courses in accordance with the Program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences, item “Support for young scientists” in the section “Supporting the activities of institutes of the Russian Academy of Sciences in attracting talented young people to research”. Collaboration has been carried out in individual research and education projects, including the Winter Limnology Course.

### **Winter Limnology Course**

The course was successfully carried out at the Lammi Biological Station (UH) on March 11–15, 2019. The Russian group of participants included, besides students and researchers from NWPI KarRC RAS, also students from the Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences (Moscow), Saint Petersburg State University, Surgut State University (SurSU), Russian State Hydrometeorological University, and students of the international master’s program CORELIS – Cold Regions Environmental Landscapes Integrated Science majoring in Ecology and Nature Management at the St. Petersburg State University.



Презентации участников  
Participants' presentations

The program of the course was rich and wide. In addition to theoretical lectures on hydrophysics, hydrochemistry and hydrobiology, the course included laboratory training and practical field exercises on four nearby lakes with different limnological characteristics. There were also excursions around the station for the students to become familiar with the regional history as well as some leisure time, including visits to the sauna, experiencing cold water swimming in an opening in lake ice cover, and conversations by the fireplace.

The course language was English, and in total 40 students and young scientists from Russia, China, Germany and Finland had the opportunity to follow the lectures (in total 10 hours), conduct field studies in 4 lakes, analyze water and ice samples in the laboratory, and prepare seminar presentations. The students were divided into the following seven small teams to work together:

1. Gas fluxes from a constructed wetland at a wastewater treatment plant
2. Algae living in lake ice
3. Effects of light on phytoplankton growth in winter conditions
4. Lake water temperature and chemical characteristics under ice
5. Observation of stratification under ice using ROV
6. Ice structure and properties
7. Mass and heat balance of ice cover

On the last day, there was a seminar where each group delivered a report in the form of oral

and written presentations. The PowerPoint presentations described briefly the study objectives, the methods applied, data processing, and the key results obtained. It became obvious that this form of international course activity is of great importance for attracting talented young people to scientific work. This is relevant today and will be in the future. Course organizers – colleagues from Russia and Finland – have agreed to continue the work.

The next Winter Limnology Course will be held at LBS in March 2020. The course program may vary a bit between years but the basic idea remains: introduce the new student generations to aquatic ecology and limnology in the harsh and highly variable winter conditions in a truly international atmosphere.

*Acknowledgements.* NWPI KarRC RAS and participants from the Russian side thank colleagues from Finland and the station's staff for the warm welcome, aimed not only at improving the level of theoretical and practical knowledge, but also for concern about the health of the participants, their stay and food.

*Tatjana Regerand, PhD,  
Secretary for Science, NWPI KarRC RAS;  
Lauri Arvola, Professor,  
Lammi Biological Station, University of Helsinki;  
Matti Leppäranta, Professor,  
University of Helsinki*

## 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. Редакционные серии и отдельные выпуски Трудов КарНЦ РАН оставляют за собой право возвращать без регистрации рукописи, не отвечающие настоящим правилам.

При получении редакцией рукопись регистрируется (в случае выполнения авторами основных правил её оформления) и направляется на отзыв рецензентам. Отзыв состоит из ответов на типовые вопросы анкеты и может содержать дополнительные расширенные комментарии. Кроме того, рецензент может вносить замечания и правки в текст рукописи. Авторам высылаются электронная версия анкеты и комментарии рецензентов. Доработанный экземпляр автор должен вернуть в редакцию вместе с первоначальным экземпляром и ответом на все вопросы рецензента не позднее чем через месяц после получения рецензии. Перед опубликованием авторам высылаются распечатанная версия статьи, которая вычитывается, подписывается авторами и возвращается в редакцию.

Журнал имеет полноценную электронную версию на базе Open Journal System (OJS), позволяющую перевести предоставление и редактирование рукописи, общение автора с редколлегией серий и рецензентами в электронный формат и обеспечивающую прозрачность процесса рецензирования при сохранении анонимности рецензентов (<http://journals.krc.karelia.ru/>).

Редакционный совет журнала «Труды Карельского научного центра РАН» (Труды КарНЦ РАН) определил для себя в качестве одного из приоритетов полную открытость издания. Это означает, что пользователям на условиях свободного доступа разрешается: читать, скачивать, копировать, распространять, печатать, искать или находить полные тексты статей журнала по ссылке без предварительного разрешения от издателя и автора. Учредители журнала берут на себя все расходы по редакционно-издательской подготовке статей и их опубликованию.

Содержание номеров Трудов КарНЦ РАН, аннотации и полнотекстовые электронные варианты статей, а также другая полезная информация, включая настоящие Правила, доступны на сайтах – <http://transactions.krc.karelia.ru>; <http://journals.krc.karelia.ru>

Почтовый адрес редакции: 185000, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, КарНЦ РАН, редакция Трудов КарНЦ РАН. Телефон: (8142) 762018.

### ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ

Статьи публикуются на русском или английском языке. Рукописи должны быть тщательно выверены и отредактированы авторами.

Объём рукописи (включая таблицы, список литературы, подписи к рисункам, рисунки) не должен превышать: для обзорных статей – 30 страниц, для оригинальных – 25, для сообщений – 15, для хроники и рецензий – 5–6. Объём рисунков не должен превышать 1/4 объёма статьи. Рукописи большего объёма (в исключительных случаях) принимаются при достаточном обосновании по согласованию с ответственным редактором.

При оформлении рукописи применяется полуторный межстрочный интервал, шрифт Times New Roman, кегль 12, выравнивание по обоим краям. Размер полей страницы – 2,5 см со всех сторон. Все страницы, включая список литературы и подписи к рисункам, должны иметь сплошную нумерацию в нижнем правом углу. Страницы с рисунками не нумеруются.

Рукописи подаются в электронном виде в формате MS Word на сайте <http://journals.krc.karelia.ru> либо на e-mail: [trudy@krc.karelia.ru](mailto:trudy@krc.karelia.ru), или же представляются в редакцию лично (г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, каб. 502). К рукописи желательно прилагать два бумажных экземпляра, напечатанных на одной стороне листа формата А4 в одну колонку.

## ОБЩИЙ ПОРЯДОК РАСПОЛОЖЕНИЯ ЧАСТЕЙ СТАТЬИ

Элементы статьи должны располагаться в следующем порядке: *УДК* курсивом на первой странице, в левом верхнем углу; заглавие статьи на русском языке заглавными буквами полужирным шрифтом; инициалы, фамилии всех авторов на русском языке полужирным шрифтом; полное название организации – места работы каждого автора в именительном падеже на русском языке курсивом (если авторов несколько и работают они в разных учреждениях, следует отметить арабскими цифрами соответствие фамилий авторов учреждениям, в которых они работают; если все авторы статьи работают в одном учреждении, можно не указывать место работы каждого автора отдельно); аннотация на русском языке; ключевые слова на русском языке; инициалы, фамилии всех авторов на английском языке полужирным шрифтом; название статьи на английском языке заглавными буквами полужирным шрифтом; аннотация на английском языке; ключевые слова на английском языке; текст статьи (статья экспериментального характера, как правило, должны иметь разделы: **Введение. Материалы и методы. Результаты и обсуждение. Выводы либо Заключение**); благодарности и указание источников финансирования выполненных исследований; списки литературы: с библиографическими описаниями на языке и алфавите оригинала (**Литература**) и транслитерированный в латиницу с переводом русскоязычных источников на английский язык (**References**); таблицы на русском и английском языках (на отдельных листах); рисунки (на отдельных листах); подписи к рисункам на русском и английском языках (на отдельном листе).

На отдельном листе дополнительные сведения об авторах: фамилии, имена, отчества всех авторов полностью на русском и английском языке; полный почтовый адрес каждой организации (страна, город) на русском и английском языке; должности, ученые звания, ученые степени авторов; адрес электронной почты для каждого автора; телефон для контактов с авторами статьи (можно один на всех авторов).

ЗАГЛАВИЕ СТАТЬИ должно точно отражать содержание статьи\* и состоять из 8–10 значимых слов.

АННОТАЦИЯ\*\* должна быть лишена вводных фраз, создавать 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 описания источника, приведенного в списке литературы, и заключаются в квадратные скобки. При перечислении нескольких источников работы располагаются в хронологическом порядке, например: [Иванов, Топоров, 1965; Успенский, 1982; Erwin et al., 1989; Атлас..., 1994; Longman, 2001].

ТАБЛИЦЫ нумеруются в порядке упоминания их в тексте, каждая таблица имеет свой заголовок. Заголовки таблиц, заголовки и содержание столбцов, строк, а также примечания приводятся на русском и английском языках. На полях бумажного экземпляра рукописи (слева) карандашом указываются места расположения таблиц при первом упоминании их в тексте. Диаграммы и графики не должны дублировать таблицы. Материал таблиц должен быть понятен без дополнительного обращения к тексту. Все сокращения, использованные в таблице, поясняются в Примечании, расположенном под ней. При повторении цифр в столбцах нужно их повторять, при повторении слов – в столбцах ставить кавычки. Таблицы могут быть книжной или альбомной ориентации (при соблюдении вышеуказанных параметров страницы).

РИСУНКИ представляются отдельными файлами с расширением TIFF (\*.TIF) или JPG. При первичной подаче материала в редакцию рисунки вставляются в общий текстовый файл. При сдаче материала, принятого в печать, все рисунки из текста статьи должны быть убраны и представлены в виде отдельных файлов в вышеуказанном формате. Графические материалы должны быть снабжены распечатками с указа-

\* Названия видов приводятся на латинском языке КУРСИВОМ, в скобках указываются высшие таксоны (семейства), к которым относятся объекты исследования.

\*\* Обращаем внимание авторов, что в связи с подготовкой журнала к включению в международные базы данных библиографических описаний и научного цитирования расширенная аннотация на английском языке, двуязычные таблицы и подписи к рисункам, а также транслитерированный в латиницу список использованной литературы приобретают особое значение.

нием желательного размера рисунка, пожеланий и требований к конкретным иллюстрациям. На каждый рисунок должна быть как минимум одна ссылка в тексте. Иллюстрации объектов, исследованных с помощью фотосъемки, микроскопа (оптического, электронного трансмиссионного и сканирующего), должны сопровождаться масштабными линейками, причем в подрисуночных подписях надо указать длину линейки. Приводить данные о кратности увеличения необязательно, поскольку при публикации рисунков размеры изменятся. Крупномасштабные карты желательно приводить с координатной сеткой, обозначениями населенных пунктов и/или названиями физико-географических объектов и разной фактурой для воды и суши. В углу карты желательна врезка с мелкомасштабной картой, где был бы указан участок, увеличенный в крупном масштабе в виде основной карты.

**ПОДПИСИ К РИСУНКАМ** приводятся на русском и английском языках, должны содержать достаточно полную информацию, для того чтобы приводимые данные могли быть понятны без обращения к тексту (если эта информация уже не дана в другой иллюстрации). Аббревиации расшифровываются в подрисуночных подписях, детали на рисунках следует обозначать цифрами или буквами, значение которых также приводится в подписях.

**ЛАТИНСКИЕ НАЗВАНИЯ.** В расширенных латинских названиях таксонов не ставится запятая между фамилией авторов и годом, чтобы была понятна разница между полным названием таксона и ссылкой на публикацию в списке литературы. Названия таксонов рода и вида печатаются курсивом. Вписывать латинские названия в текст от руки недопустимо. Для флористических, фаунистических и таксономических работ при первом упоминании в тексте и таблицах приводится русское название вида (если такое название имеется) и полностью – латинское, с автором и желательно с годом, например: водяной ослик (*Asellus aquaticus* (L. 1758)). В дальнейшем можно употреблять только русское название или сокращенное латинское без фамилии автора и года опубликования, например, для брюхоногого моллюска *Margarites groenlandicis* (Gmelin 1790) – *M. groenlandicus* или для подвида *M. g. umbilicalis*.

**СОКРАЩЕНИЯ.** Разрешаются лишь общепринятые сокращения – названия мер, физических, химических и математических величин и терминов и т. п. Все сокращения должны быть расшифрованы, за исключением небольшого числа общепотребительных.

**БЛАГОДАРНОСТИ.** В этой рубрике выражается признательность частным лицам, сотрудникам учреждений и фондам, оказавшим содействие в проведении исследований и подготовке статьи, а также указываются источники финансирования работы.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.** Пристатейные ссылки и/или списки пристатейной литературы следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5-2008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления ([http://www.bookchamber.ru/GOST\\_P\\_7.0.5.-2008](http://www.bookchamber.ru/GOST_P_7.0.5.-2008)). Список работ представляется в алфавитном порядке. Все ссылки даются на языке оригинала (названия на японском, китайском и других языках, использующих нелатинский шрифт, пишутся в русской транскрипции). Сначала приводится список работ на русском языке и на языках с близким алфавитом (украинский, болгарский и др.), а затем – работы на языках с латинским алфавитом. В списке литературы между инициалами ставится пробел.

**ТРАНСЛИТЕРИРОВАННЫЙ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES).** Приводится отдельным списком, повторяя все позиции основного списка литературы. Описания русскоязычных работ указываются в латинской транслитерации, рядом в квадратных скобках помещается их перевод на английский язык. Выходные данные приводятся на английском языке (допускается транслитерация названия издательства). При наличии переводной версии источника можно указать его библиографическое описание вместо транслитерированного. Библиографические описания прочих работ приводятся на языке оригинала. Для составления списка рекомендуется использование бесплатных онлайн-сервисов транслитерации, вариант BSI.

Внимание! С 2015 года каждой статье, публикуемой в «Трудах Карельского научного центра РАН», редакцией присваивается уникальный идентификационный номер цифрового объекта (DOI) и статья включается в базу данных Crossref. **Обязательным условием является указание в списках литературы DOI для тех работ, у которых он есть.**

## **ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ 1-Й СТРАНИЦЫ**

УДК 631.53.027.32:635.63

### **ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ПРЕДПОСЕВНОГО ЗАКАЛИВАНИЯ СЕМЯН НА ХОЛОДОУСТОЙЧИВОСТЬ РАСТЕНИЙ ОГУРЦА**

**Е. Г. Шерудило<sup>1</sup>, М. И. Сысоева<sup>1</sup>, Г. Н. Алексейчук<sup>2</sup>, Е. Ф. Марковская<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт биологии Карельского научного центра РАН

<sup>2</sup>Институт экспериментальной ботаники НАН Республики Беларусь им. В. Ф. Купревича

Аннотация на русском языке

Ключевые слова: *Cucumis sativus* L.; кратковременное снижение температуры; устойчивость.

**E. G. Sherudilo, M. I. Sysoeva, G. N. Alekseichuk, E. F. Markovskaya. EFFECTS OF DIFFERENT REGIMES OF SEED HARDENING ON COLD RESISTANCE IN CUCUMBER PLANTS**

Аннотация на английском языке

Keywords: *Cucumis sativus* L.; temperature drop; resistance.

**ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТАБЛИЦЫ**

Таблица 2. Ультраструктура клеток мезофилла листа в последствии 10-минутного охлаждения (2 °С) проростков или корней пшеницы

Table 2. Ultrastructure of leaf mesophyll cells after the exposure of wheat seedlings or roots to 10 min of chilling at 2 °C

Показатель Index	Контроль Control	Охлаждение проростков Seedling chilling	Охлаждение корней Root chilling
Площадь среза хлоропласта, мкм <sup>2</sup> Chloroplast cross-sectional area, μm <sup>2</sup>	10,0 ± 0,7	13,5 ± 1,1	12,7 ± 0,5
Площадь среза митохондрии, мкм <sup>2</sup> Mitochondria cross-sectional area, μm <sup>2</sup>	0,4 ± 0,03	0,5 ± 0,03	0,6 ± 0,04
Площадь среза пероксисомы, мкм <sup>2</sup> Peroxisome cross-sectional area, μm <sup>2</sup>	0,5 ± 0,1	0,5 ± 0,1	0,7 ± 0,1
Число хлоропластов на срезе клетки, шт. Number of chloroplasts in cell cross-section	9 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
Число митохондрий на срезе клетки, шт. Number of mitochondria in cell cross-section	8 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
Число пероксисом на срезе клетки, шт. Number of peroxisomes in cell cross-section	2 ± 0,3	2 ± 0,3	3 ± 0,4

Примечание. Здесь и в табл. 3: все параметры ультраструктуры измеряли через 24 ч после охлаждения.

Note. Here and in Tab. 3 all ultrastructure parameters were measured 24 h after chilling.

**ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ПОДПИСИ К РИСУНКУ**

Рис. 1. Северный точильщик (*Hadrobregmus confuses* Kraaz.)

Fig. 1. Woodboring beetle *Hadrobregmus confuses* Kraaz.

Рис. 5. Результаты изучения кристаллитов и демпферных зон в образце кварца из Дульдурги:

(а) – электронная микрофотография кварца; (б) – картина микродифракции, полученная для участка 1 в области кристаллитов; (в) – картина микродифракции, отвечающая участку 2 в области демпферных зон

Fig. 5. Results of the study of crystallites and damping zones in a quartz sample from Duldurga:

(a) – electron microphotograph of the quartz sample; (б) – microdiffraction image of site 1 in the crystallite area; (в) – microdiffraction image corresponding to site 2 in the damping area

**ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ**

Ссылки на книги

Вольф Г. Н. Дисперсия оптического вращения и круговой дихроизм в органической химии / Ред. Г. Снатцке. М.: Мир, 1970. С. 348–350.

Патрушев Л. И. Экспрессия генов. М.: Наука, 2000. 830 с.

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques / Eds P. V. Sundaram, F. L. Eckstein. N. Y., San Francisco: Acad. Press, 1978. P. 169–188.

В транслитерированном списке литературы:

Vol'f G. N. Dispersiya opticheskogo vrashheniya i krugovoj dikhroizm v organicheskoy khimii [Optical rotatory dispersion and circular dichroism in Organic Chemistry]. Ed. G. Snattske. Moscow: Mir, 1970. P. 348–350.

Patrushev L. I. Ekspressiya genov [Gene expression]. Moscow: Nauka, 2000. 830 p.

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques. Eds P. V. Sundaram, F. L. Eckstein. N. Y., San Francisco: Acad. Press, 1978. P. 169–188.

Ссылки на статьи

Викторов Г. А. Межвидовая конкуренция и сосуществование экологических гомологов у паразитических перепончатокрылых // Журн. общ. биол. 1970. Т. 31, № 2. С. 247–255.

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri* // J. Fish. Biol. 1978. Vol. 12, no. 4. P. 507–516.

Noctor G., Queval G., Mhamdi A., Chaouch A., Foyer C. H. Glutathione // Arabidopsis Book. American Society of plant Biologists, Rockville, MD. 2011. doi:10.1199/tab.0142

В транслитерированном списке литературы:

Viktorov G. A. Mezhhvidovaya konkurentsia i sosushhestvovanie ehkologicheskikh gomologov u paraziticheskikh pereponchatokrylykh [Interspecific competition and coexistence ecological homologues in parasitic Hymenoptera]. Zhurn. obshh. biol. [Biol. Bull. Reviews]. 1970. Vol. 31, no. 2. P. 247–255.

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri*. J. Fish. Biol. 1978. Vol. 12, no. 4. P. 507–516.

Noctor G., Queval G., Mhamdi A., Chaouch A., Foyer C. H. Glutathione. Arabidopsis Book. American Society of plant Biologists, Rockville, MD. 2011. doi: 10.1199/tab.0142

Ссылки на материалы конференций

Марьинских Д. М. Разработка ландшафтного плана как необходимое условие устойчивого развития города (на примере Тюмени) // Экология ландшафта и планирование землепользования: тезисы докл. Всерос. конф. (Иркутск, 11–12 сент. 2000 г.). Новосибирск, 2000. С. 125–128.

В транслитерированном списке литературы:

Mar'inskikh D. M. Razrabotka landshaftnogo plana kak neobkhodimoe uslovie ustoichivogo razvitiya goroda (na primere Tyumeni) [Landscape planning as a necessary condition for sustainable development of a city (example of Tyumen)]. Ekologiya landshafta i planirovanie zemlepol'zovaniya: Tezisy dokl. Vseros. konf. (Irkutsk, 11–12 sent. 2000 g.) [Landscape ecology and land-use planning: abstracts of all-Russian conference (Irkutsk, Sept. 11–12, 2000)]. Novosibirsk, 2000. P. 125–128.

Ссылки на диссертации или авторефераты диссертаций

Шефтель Б. И. Экологические аспекты пространственно-временных межвидовых взаимоотношений землероек Средней Сибири: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1985. 23 с.

Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Дис. ... докт. хим. наук. Петрозаводск, 2006. 481 с.

В транслитерированном списке литературы:

Sheftel' B. I. Ekologicheskie aspekty prostranstvenno-vremennykh mezhhvidovykh vzaimootnoshenii zemlerоек Srednei Sibiri [Ecological aspects of spatio-temporal interspecies relations of shrews of Middle Siberia]: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Moscow, 1985. 23 p.

Lozovik P. A. Gidrogeokhimicheskie kriterii sostoyaniya poverkhnostnykh vod gumidnoi zony i ikh ustoichivosti k antropogennomu vozdeistviyu [Hydrogeochemical criteria of the state of surface water in humid zone and their tolerance to anthropogenic impact]: DSc (Dr. of Chem.) thesis. Petrozavodsk, 2006. 481 p.

Ссылки на патенты

Патент РФ № 2000130511/28.04.12.2000.

Еськов Д. Н., Серегин А. Г. Оптико-электронный аппарат // Патент России № 2122745. 1998. Бюл. № 33.

В транслитерированном списке литературы:

Patent RF № 2000130511/28. 04.12.2000 [Russian patent No. 2000130511/28. December 4, 2000].

Es'kov D. N., Seregin A. G. Optiko-elektronnyi apparat [Optoelectronic apparatus]. Patent Rossii № 2122745 [Russian patent No. 2122745]. 1998. Bulletin No. 33.

Ссылки на архивные материалы

Гребенщиков Я. П. К небольшому курсу по библиографии: материалы и заметки, 26 февр. – 10 марта 1924 г. // ОР РНБ. Ф. 41. Ед. хр. 45. Л. 1–10.

В транслитерированном списке литературы:

Grebenshchikov Ya. P. K nebol'shomu kursu po bibliografii: materialy i zametki, 26 fevr. – 10 marta 1924 g. [Brief course on bibliography: the materials and notes, Febr. 26 – March 10, 1924]. OR RNB. F. 41. St. un. 45. L. 1–10.

Ссылки на интернет-ресурсы

Паринов С. И., Ляпунов В. М., Пузырев Р. Л. Система Соционет как платформа для разработки научных информационных ресурсов и онлайн-сервисов // Электрон. б-ки. 2003. Т. 6, вып. 1. URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (дата обращения: 25.12.2015).

Демография. Официальная статистика / Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gks.ru/> (дата обращения: 25.12.2015).

В транслитерированном списке литературы:

*Parinov S. I., Lyapunov V. M., Puzyrev R. L.* Sistema Sotsionet kak platforma dlya razrabotki nauchnykh informatsionnykh resursov i onlainovykh servisov [Socionet as a platform for development of scientific information resources and online services]. *Elektron. b-ki [Digital library]*. 2003. Vol. 6, iss. 1. URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (accessed: 25.11.2006).

*Demografija.* Oficial'naja statistika [Demography. Official statistics]. *Federal'naja sluzhba gosudarstvennoj statistiki [Federal state statistics service]*. URL: <http://www.gks.ru/> (accessed: 25.12.2015).

Ссылки на электронные ресурсы на CD-ROM

Государственная Дума, 1999–2003 [Электронный ресурс]: электронная энциклопедия / Аппарат Гос. Думы Федер. Собрания Рос. Федерации. М., 2004. 1 CD-ROM.

В транслитерированном списке литературы:

*Gosudarstvennaya Duma, 1999–2003* [State Duma, 1999–2003]. Electronic encyclopedia. The office of the State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation. Moscow, 2004. 1 CD-ROM.

**Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences**  
**No. 9, 2019**  
**“LIMNOLOGY AND OCEANOLOGY”**

**TABLE OF CONTENTS**

HYDROPHYSICS. HYDROLOGY

- I. S. Zverev, R. E. Zdorovenov, G. E. Zdorovenova, S. R. Bogdanov, S. Yu. Volkov, G. G. Gavrilenko, T. V. Efremova, N. I. Palshin, S. D. Golosov, A. Yu. Terzhevik. MODELING THE THERMO-HYDRODYNAMICS OF A SHALLOW BOREAL LAKE: 3D MODEL VERIFICATION . . . . . 5
- N. I. Palshin, S. R. Bogdanov, T. V. Efremova, A. O. Kuzina. ESTIMATES OF THERMAL DIFFUSIVITY IN DIMICTIC LAKES . . . . . 18
- N. N. Filatov, L. E. Nazarova, P. V. Druzhinin. INFLUENCE OF CLIMATIC AND ANTHROPOGENIC FACTORS ON THE WHITE SEA – CATCHMENT SYSTEM . . . . . 30

HYDROCHEMISTRY AND BOTTOM SEDIMENTS

- V. S. Valiev, D. V. Ivanov, R. R. Shagidullin. A METHOD FOR INTEGRATED ASSESSMENT OF SEDIMENT POLLUTION . . . . . 51
- T. A. Efremova, M. V. Zobkova. CONCENTRATION, DISTRIBUTION AND RATIO OF THE MAIN ORGANIC MATTER COMPONENTS IN LAKE ONEGO WATER. . . . . 60
- A. V. Sabylina, O. I. Ikko. CHANGES IN THE CHEMICAL COMPOSITION OF LAKE MUNOZERO (KARELIA) WATER OVER THE PAST 60 YEARS . . . . . 76

HYDROBIOLOGY

- M. V. Kolchenko, E. V. Stanislavskaya. SEASONAL DYNAMICS OF EPIPHYTON IN TWO LAKES OF DIFFERENT TYPES IN NORTHWEST RUSSIA . . . . . 91
- M. T. Syarki, Yu. Yu. Fomina. ZOOPLANKTON OF LAKE ONEGO IN ITS CENTRAL PART AND BOLSHOE ONEGO BAY IN YEARS WITH DIFFERENT TEMPERATURE CONDITIONS. . . . . 104

RESEARCH METHODS

- Yu. S. Datsenko. METHODS FOR ASSESSMENT OF INTERNAL NUTRIENT LOAD OF WATER BODIES (A REVIEW) . . . . . 116
- D. V. Kondrik, E. E. Kazakov, D. V. Pozdnyakov, O. M. Johannessen. SATELLITE EVIDENCE FOR ENHANCEMENT OF THE COLUMN MIXING RATIO OF ATMOSPHERIC CO<sub>2</sub> OVER *E. HUXLEYI* BLOOMS 125
- P. Yu. Litinsky. ONEGO LAKE CATCHMENT ECOSYSTEM GIS AS A TOOL FOR ESTIMATING COMPONENTS OF THE WATER AND CARBON BALANCE. . . . . 136
- V. V. Menshutkin, N. N. Filatov. COGNITIVE MODELING OF THE FISHERIES EFFECT ON THE STANDARD OF LIVING IN THE WHITE SEA AREA . . . . . 145

CHRONICLE

R. R. Shagidullin, D. V. Ivanov. 2 <sup>nd</sup> International Conference "Lakes of Eurasia: Problems and Solutions" (Kazan, May 19–24, 2019) . . . . .	155
T. Regerand, L. Arvola, M. Leppäranta. International scientific and teaching collaboration: Winter Limnology Course at the Lammi Biological Station. . . . .	160
INSTRUCTIONS FOR AUTHORS . . . . .	167



Научный журнал

**Труды Карельского научного центра  
Российской академии наук**  
№ 9, 2019

ЛИМНОЛОГИЯ И ОКЕАНОЛОГИЯ

*Печатается по решению Ученого совета  
Федерального исследовательского центра  
«Карельский научный центр Российской академии наук»*

Выходит 12 раз в год

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций  
Регистрационная запись ПИ № ФС 77-72429 от 28.02.2018 г.

Редактор А. И. Мокеева  
Компьютерная верстка Г. О. Предтеченский

Подписано в печать 23.09.2019. Дата выхода 30.09.2019. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>.  
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 18,2. Усл. печ. л. 20,4.  
Тираж 150 экз. Заказ 575. 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