

Карельский научный центр
Российской академии наук

ТРУДЫ

КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

№ 5, 2016

Серия ЛИМНОЛОГИЯ

Петрозаводск
2016

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

Редакционный совет

А. М. АСХАБОВ, академик РАН, д. г.-м. н., проф.; Т. ВИХАВАЙНЕН, доктор истории, проф.; А. В. ВОРОНИН, д. т. н., проф.; С. П. ГРИППА, к. г. н., доцент; Э. В. ИВАНТЕР, член-корр. РАН, д. б. н., проф.; А. С. ИСАЕВ, академик РАН, д. б. н., проф.; А. М. КРЫШЕНЬ (зам. главного редактора), д. б. н.; Е. В. КУДРЯШОВА, д. флс. н., проф.; В. В. МАЗАЛОВ, д. ф.-м. н., проф.; И. И. МУЛЛОНЕН, д. фил. н., проф.; Н. Н. НЕМОВА, член-корр. РАН, д. б. н., проф.; В. В. ОКРЕПИЛОВ, академик РАН, д. э. н.; О. Н. ПУГАЧЕВ, член-корр. РАН, д. б. н.; Ю. В. САВЕЛЬЕВ, д. э. н.; Д. А. СУБЕТТО, д. г. н.; Н. Н. ФИЛАТОВ, член-корр. РАН, д. г. н., проф.; В. В. ЩИПЦОВ, д. г.-м. н., проф.

Editor-in-Chief
A. F. TITOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.

Editorial Council

A. M. ASKHABOV, RAS Academician, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; N. N. FILATOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Geog.), Prof.; S. P. GRIPPA, PhD (Geog.), Assistant Prof.; A. S. ISAEV, RAS Academician, DSc (Biol.), Prof.; E. V. IVANTER, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; A. M. KRYSHEN' (Deputy Editor-in-Chief), DSc (Biol.); E. V. KUDRYASHOVA, DSc (Phil.), Prof.; V. V. MAZALOV, DSc (Phys.-Math.), Prof.; I. I. MULLONEN, DSc (Philol.), Prof.; N. N. NEMOVA, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; V. V. OKREPILOV, RAS Academician, DSc (Econ.); O. N. PUGACHYOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.); Yu. V. SAVELIEV, DSc (Econ.); V. V. SHCHIPTSOV, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; D. A. SUBETTO, DSc (Geog.); T. VIHAVAINEN, PhD (Hist.), Prof.; A. V. VORONIN, DSc (Tech.), Prof.

Редакционная коллегия серии «Лимнология»

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

Editorial Board of the Limnology Series

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

ISSN 1997-3217 (печатная версия)
ISSN 2312-4504 (онлайн-версия)

Адрес редакции: 185910 Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11
тел. (8142)762018; факс (8142)769600
E-mail: trudy@krc.karelia.ru
Электронная полнотекстовая версия: <http://transactions.krc.karelia.ru>

© Карельский научный центр РАН, 2016
© Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН, 2016

ГИДРОФИЗИКА. ГИДРОГЕОЛОГИЯ

УДК 556.555.4“324”

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ МЕЛКОВОДНОГО ОЗЕРА ЗИМОЙ

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

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Анализ данных полевых измерений температуры в небольшом мелководном озере Вендюрском в зимние месяцы 2014–2015 гг. с использованием высокочувствительного оборудования позволил выявить особенности теплового режима его водной толщи и придонного слоя. Оценки теплового потока, направленного из донных отложений в воду, показали резкое уменьшение его величины от $2\text{--}5 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ в предледоставный период до $1\text{--}1,5 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ в первые дни ледостава и затем плавное уменьшение до $0,4 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ к концу зимы. На фоне сезонного повышения температуры наблюдались ее пульсации ΔT , которые изменялись во времени и по глубине в довольно широком диапазоне, при этом участки с «фоновыми» значениями на уровне в несколько тысячных градуса чередовались с «активными» интервалами, где величина ΔT возрастала на порядок и более. В придонных слоях наиболее резкие изменения температуры приводили к усилению теплопотока от фоновых значений $0,5\text{--}1,1 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ до $3\text{--}5 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$. «Фоновым» колебаниям температуры соответствовали вертикальные перемещения изотерм порядка $1\text{--}2 \text{ мм}$ и вертикальные скорости порядка $10^{-5} \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, «активным» – перемещения до нескольких см и скорости на один-два порядка выше. «Активные» интервалы наблюдались на фоне усиления атмосферного воздействия на озеро (резких перепадов атмосферного давления и усиления ветра). Значительные колебания глубины залегания изотерм и характер зависимости амплитуды колебаний температуры от глубины позволяют предположить их бароклинную природу, то есть они могут быть обусловлены внутренними волнами в стратифицированном озере.

Ключевые слова: температура воды; мелководное озеро; колебания; период ледостава; теплопоток.

**G. E. Zdrovennova, R. E. Zdrovennov, N. I. Palshin, T. V. Efremova,
G. G. Gavrilenko, S. R. Bogdanov, A. Yu. Terzhevik. THERMAL REGIME
OF A SHALLOW LAKE IN WINTER**

The thermodynamics of the water column and the bottom layer of a small shallow lake Vendyurskoe were identified from the analysis of temperature measurements by high resolution equipment during the winter 2014–2015. Estimates of the heat flux from the bot-

tom sediments into the water revealed a sharp decrease in its value from 2–5 W·m⁻² before lake freezing up to 1–1.5 W·m⁻² in the first days of the ice-covered period, and then a slow decrease to 0.4 W·m⁻² by the end of the winter. Temperature oscillations of different amplitudes and periods are observed against the background of its seasonal increase. The oscillations ΔT varied with time and depth in a wide range, with areas of “background” values of a few thousandths of a degree alternating with “active” intervals where ΔT value increased by an order of magnitude or more. The sharpest changes in near-bottom temperature led to an increase in the heat flux from the background values of 0.5–1.1 W·m⁻² to 3–5 W·m⁻². “Background” temperature oscillations corresponded to 1–2 mm vertical displacement of the isotherms, and vertical rates of about 10⁻⁵ m·s⁻¹, whereas “active” oscillations corresponded to displacements of up to several cm and rates 1–2 orders of magnitude higher. “Active” intervals were observed when atmospheric forcing on the lake (sharp fluctuations of atmospheric pressure and wind intensification) increased. Significant fluctuations of the depth of isotherms and the dependence of the temperature oscillation amplitude on the depth suggest they are of baroclinic nature, i. e. may be caused by internal waves in a stratified lake.

Keywords: water temperature; shallow lake; fluctuations; ice-covered period; heat flux.

Введение

В последнее время усилился интерес к исследованиям сезонно замерзающих озер, однако многие процессы и явления, происходящие в них, остаются недостаточно изученными. На малых бореальных озерах ледостав продолжается несколько месяцев [Kirillin et al., 2012], оказывая определяющее влияние на функционирование их экосистем. Зимой гидрофизические процессы в озерах замедлены. В условиях изолированности от ветрового воздействия подледные течения и циркуляции играют решающую роль в перераспределении тепла, солей, газов, растворенных и взвешенных веществ по водной толще озер, несмотря на то, что их скорости не превышают нескольких мм·с⁻¹ [Петров и др., 2007; Rizk et al., 2014]. Наиболее заметные изменения температуры мелководных озер происходят в течение первого месяца подледного периода [Петров и др., 2006], причем особенно выражены в придонном слое. Тепловой поток, направленный из донных отложений в воду и максимальный в первые недели ледостава, постепенно истощается. По оценкам, на разнотипных бореальных озерах величина теплопотока, направленного из донных отложений в воду, в начале зимы достигает 10 Вт·м⁻², к концу первого месяца ледостава снижается до 1–2 Вт·м⁻² и затем продолжает незначительно уменьшаться [Bengtsson, Svensson, 1996; Kirillin et al., 2009; Zdrovennova, 2009; Гавриленко и др., 2015]. Атмосферное воздействие на покрытое льдом озеро традиционно рассматривается лишь с точки зрения изменения толщины льда и формирования его структуры [Бояринов, Петров, 1991]. В работе [Malm et al., 1997] высказано предположение,

что перепады атмосферного давления и интенсификация ветра над озером могут приводить к усилению подледной гидродинамики: синхронные измерения колебаний поверхности льда, скорости ветра, перепадов атмосферного давления над озером и скорости течения под льдом показали, что при усилении атмосферного воздействия происходит интенсификация течений. В работе [Здоровеннов и др., 2011] отмечено полное затухание осциллирующих колебаний температуры в штилевых условиях. Однако весь спектр атмосферного воздействия на малое озеро, покрытое льдом, и физические механизмы теплопереноса, происходящие как в его водной толще, так и в придонных слоях, остаются слабоизученными.

Настоящая работа посвящена изучению особенностей теплового режима покрытого льдом озера. Приведены результаты измерений температуры воды в небольшом карельском озере Вендюрском в зимние месяцы 2014–2015 гг. и рассмотрены особенности термического режима его водной толщи и придонного слоя в течение зимнего сезона.

Материалы и методы

Объект исследования – небольшое мелководное мезотрофное озеро Вендюрское, расположенное в южной части Карелии (62°10′–62°20′N, 33°10′–33°20′E). Площадь зеркала озера оценивается в 10,4 км², объем вод ~5,5·10⁷ м³, средняя глубина составляет 5,3 м, максимальная – 13,4 м; площадь водосборного бассейна – 82,8 км². В озеро впадает р. Риндозерка и несколько небольших ручьев, вытекает р. Кулапдеги, однако объем их стока невелик. Сток с водосбора озера

и атмосферные осадки оказывают определяющее влияние на изменения объема озерных вод в течение года. Коэффициент водообмена озера равен $0,4 \text{ год}^{-1}$. Прозрачность воды по диску Секки достигает $3,0 \pm 0,5 \text{ м}$. Донные отложения представляют собой песок на мелководье (на глубинах не более 2–3 м) и коричневые и темно-коричневые илы в глубоководной части озера [Литинская, Поляков, 1975].

В период с октября 2014 г. по июнь 2015 г. в центральной глубоководной части озера Вендюрского на глубине 11,1–11,3 м проводились измерения температуры водной толщи и придонного слоя воды с высоким разрешением по пространству и времени. Высокочувствительные датчики температуры производства канадской фирмы «RBR Ltd» (точность $\pm 0.002 \text{ }^\circ\text{C}$, разрешение $< 0.00005 \text{ }^\circ\text{C}$), были размещены на косе и придонной платформе [Патент..., 2015]. На косе использовалось 16 датчиков; в придонном слое датчики располагались через 2–30 см, в водной толще – через метр. Датчики находились на глубинах 2,34; 2,84; 3,34; 3,84; 4,84; 6,84; 7,84; 8,84; 9,84; 10,34; 10,59; 10,89; 10,94; 10,99; 11,01 и 11,03 м. На придонной платформе десять датчиков размещались со сдвигом 2 см. Придонная платформа погрузилась в ил, верхний горизонт наблюдений располагался на глубине около 2 см в донных отложениях, нижний – на глубине около 20 см. Дискретность измерений на термокосе и придонной платформе составляла одну минуту. Данные обрабатывались с использованием пакетов Excel и SciLab. Тепловой поток Q из донных отложений в воду был оценен по градиентному методу:

$$Q = -\lambda \frac{dT}{dz},$$

где λ – коэффициент молекулярной теплопроводности, для воды принималось значение $0,56 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{}^\circ\text{C}^{-1}$, для донных отложений $0,62 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{}^\circ\text{C}^{-1}$ [Malm et al., 1997], dT/dz – вертикальный градиент температуры, $^\circ\text{C}\cdot\text{м}^{-1}$, между соседними датчиками.

Эффективный коэффициент температуропроводности λ_{eff} был оценен по соотношению между линейным масштабом деформации температурного профиля и временем этой деформации [Golosov et al., 2003]:

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{(D-h)^2}{t} \quad (1)$$

где D – глубина, м; h – толщина перемешанного слоя, м; t – время, с.

Вертикальные смещения s и скорости вертикальных смещений V_z в условиях устойчивой стратификации рассчитывались по амплитуде

пульсаций температуры ΔT и градиенту средней температуры $\bar{T}$:

$$s = \Delta T / (d\bar{T} / dz) \quad (2)$$

$$V_z = s / \Delta t \quad (3)$$

В анализе погодных условий района исследований использовались данные по одной из наиболее близко расположенных к оз. Вендюрскому (расстояние порядка 70 км) метеостанций Федеральной службы РФ по гидрометеорологии и мониторингу природной среды – МС «Петрозаводск» (WMO_ID=22820, информация получена на сайте «Расписание погоды», rp5.ru).

Результаты и обсуждение

Сплошной ледяной покров образовался на озере Вендюрском 21 ноября 2014 г. при средней температуре воды по вертикали в центральной части озера около $0,05 \text{ }^\circ\text{C}$. Сразу после появления льда началось резкое повышение температуры воды, наиболее выраженное в придонном слое центральной котловины (рис. 1, А). Уже к 30 ноября, через девять суток ледостава, температура воды вблизи границы с донными отложениями повысилась до $2 \text{ }^\circ\text{C}$, при этом температура верхнего пятиметрового слоя водной толщи увеличилась всего на $0,05 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 1, Б). Температура верхнего слоя донных отложений в центральной глубоководной части озера к концу первого месяца ледостава достигла $3,5 \text{ }^\circ\text{C}$, затем продолжала повышаться и к концу зимы превышала $4,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 2, А).

Теплопоток, направленный из донных отложений в воду, в центральной части озера достигал в предледоставный период $2,5\text{--}4,5 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$, после появления сплошного льда резко снизился до $1\text{--}1,5 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$, затем в течение зимы продолжал понижаться и в конце ледостава не превышал $0,4 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ (рис. 2, Б).

Очевидно, что резкое повышение температуры воды придонных слоев в первые дни и недели ледостава не могло быть достигнуто только посредством молекулярной теплопередачи. Оценки коэффициента эффективной температуропроводности, выполненные по деформации вертикального температурного профиля в центральной части озера Вендюрского в течение первой недели ледостава 21–28 ноября 2014 г. (формула 1), показали значение $6,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2\cdot\text{с}^{-1}$, что превышает молекулярный уровень на два порядка. Эти значения хорошо согласуются с оценками λ_{eff} , полученными ранее по данным измерений температуры

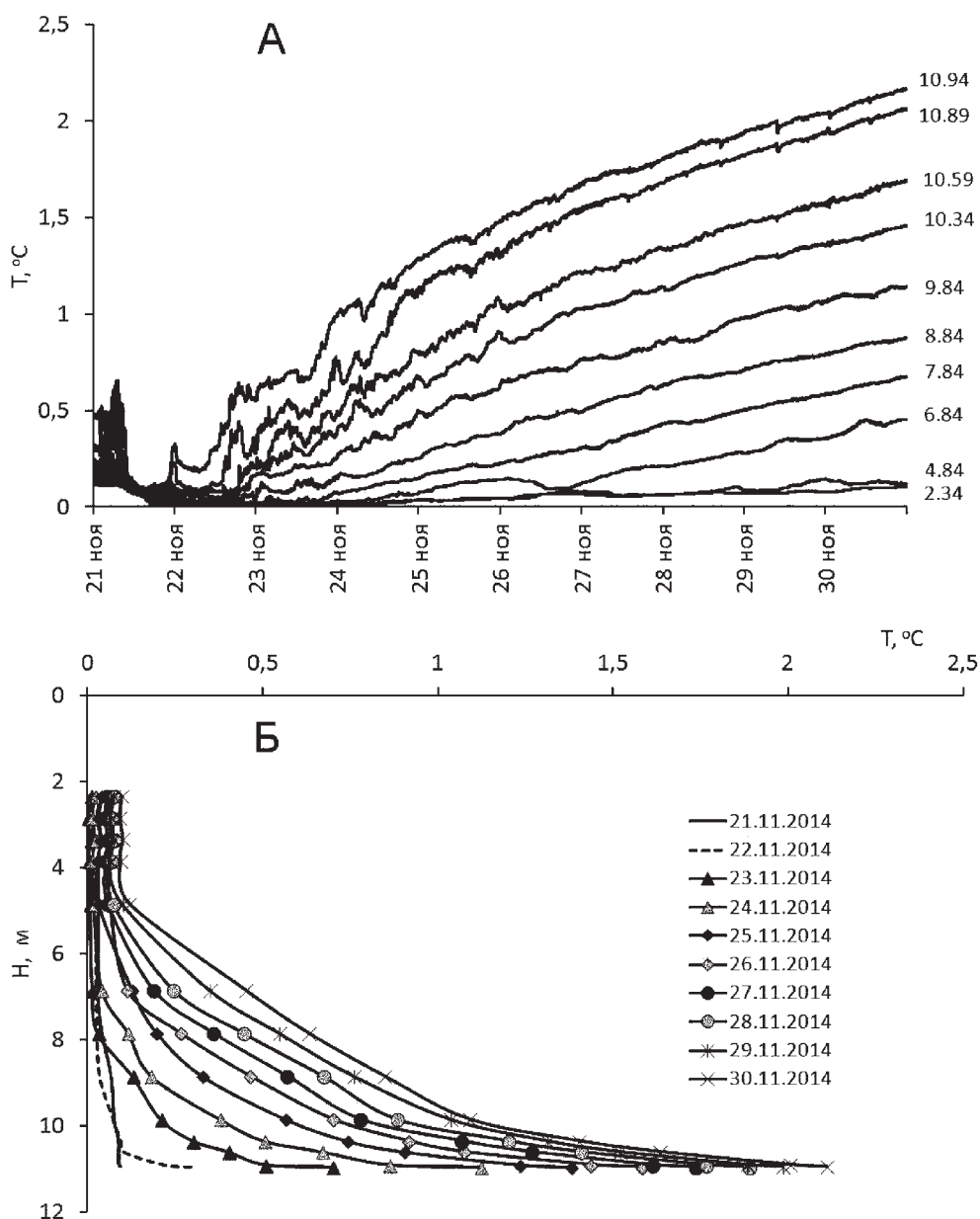


Рис. 1. А – температура водной толщ оз. Вендюрского 21–30 ноября 2014 г. Цифрами обозначена глубина горизонта измерений, м. Б – вертикальные профили температуры воды 21–30 ноября 2014 г.

в озере Вендюрском в 1995–1997 и 1998–2000 гг. для первых четырех недель ледостава от $1 \cdot 10^{-4}$ до $8,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, со средним значением $2,3\text{--}8,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ [Петров и др., 2006], что позволяет с уверенностью говорить о том, что теплоперенос в придонных слоях озера в начальный период зимы не ограничивается только молекулярной диффузией.

Определенный вклад в повышение температуры придонных слоев центральной котловины может вносить склоновый перенос теплых вод с мелководий. Механизм этого переноса описан в ряде работ [Mortimer, Mackereth, 1958; Malm, 1998]. Оценки изменения тепло-содержания столба воды по разнице тепловых

потоков на границах с донными отложениями и льдом проводились по данным последовательных пространственных температурных съемок на озере Вендюрском в зимний сезон 1995–1996 гг.

Было показано, что на мелководьях (с глубиной менее 3–4 м) теплосодержание столба воды уменьшается в течение зимнего сезона, а в глубоководных частях акватории – увеличивается, причем эти изменения лишь частично покрываются разницей тепловых потоков, что позволяет предполагать наличие горизонтального переноса тепла в озере.

Другим очевидным объяснением наблюдающейся изменчивости температурного профиля

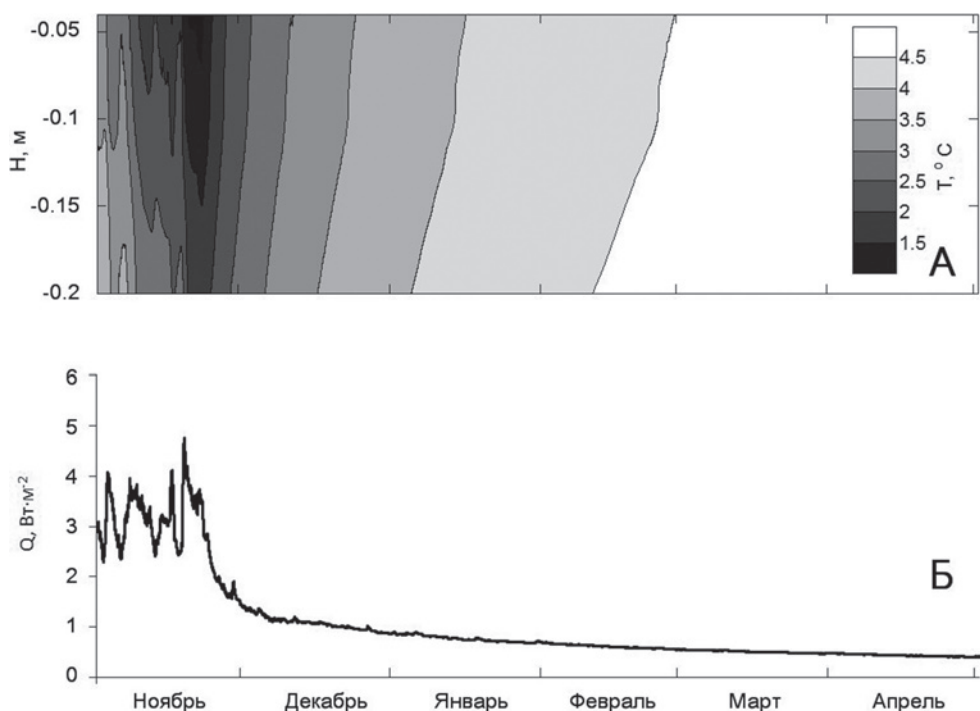


Рис. 2. Температура верхнего 20-см слоя донных отложений оз. Вендюрского (А) и теплоток на глубине 10 см под поверхностью донных отложений (Б) в период с 1 ноября 2014 г. по 30 апреля 2015 г.

в начальный период зимы может быть усиление теплового потока, направленного из донных отложений в воду при интенсификации подледной гидродинамики в целом и придонных слоев в частности.

В записях температурных датчиков косы на фоне сезонного роста температуры отмечались флуктуации разной периодичности и амплитуды (рис. 3, А). В частности, амплитуда колебаний температуры достигала 0,01–0,5 °С; периоды изменялись от 5–25 минут до нескольких часов. Как было показано ранее [Петров и др., 2006; Zdrovennova, 2009; Здорovenнов и др., 2011], на протяжении всей зимы в озере Вендюрском отмечаются колебания температуры воды и верхнего слоя донных отложений (достигающие десятых долей градуса), причем диапазон периодов этих колебаний весьма широк – от минут до нескольких суток. Основной причиной таких колебаний были названы баротропные и бароклинные сейши.

Наряду с осциллирующими изменениями, наиболее часто встречающимися в записях температурных датчиков, зимой 2014–2015 гг. наблюдалась и менее упорядоченная динамика. В частности, в придонных слоях центральной котловины часто происходили резкие всплески температуры, «эпицентр» которых обычно находился в воде на некотором расстоянии (порядка 20 см) от границы с донными отложениями.

В качестве примера на рис. 3 приведено одно из таких «событий», зафиксированное датчиками термокосы в период с 12 ч 18 января до 19 ч 19 января 2015 г. На расстоянии 0,07–0,21 м над дном наблюдалось резкое падение температуры в 12 ч 18 января и в 7 ч 19 января. Затем температура скачкообразно изменялась, то понижаясь на 0,05–0,3 °С за 5–10 минут, то повышаясь. На горизонте 0,51 м изменения температуры были сглажены: уменьшение температуры в течение 6–7 ч на 0,2 °С, затем температура менялась мало до 6 ч утра 19 января, когда началось повышение температуры до фоновых значений, продолжавшееся 4 ч. На вышележащих горизонтах, расположенных над дном в 1,26 и 2,26 м, были зафиксированы кратковременные резкие повышения температуры на 0,1–0,2 °С в течение нескольких минут и возвращение к фоновым значениям. Наиболее выраженные изменения температуры были зафиксированы на горизонтах 0,16–0,51 м. Изменения температуры вызывали резкие возрастания теплотокот от фоновых значений 0,7–1,1 Вт·м⁻² до 3–5 Вт·м⁻² (рис. 3, Б). Максимальная величина теплотокот соответствовала горизонтам с максимальными температурными градиентами. Резкие скачки температуры наблюдались более 10 раз в течение зимы 2014–2015 г. В предыдущие годы исследований описанные резкие скачки температуры в придонных слоях глубоководной

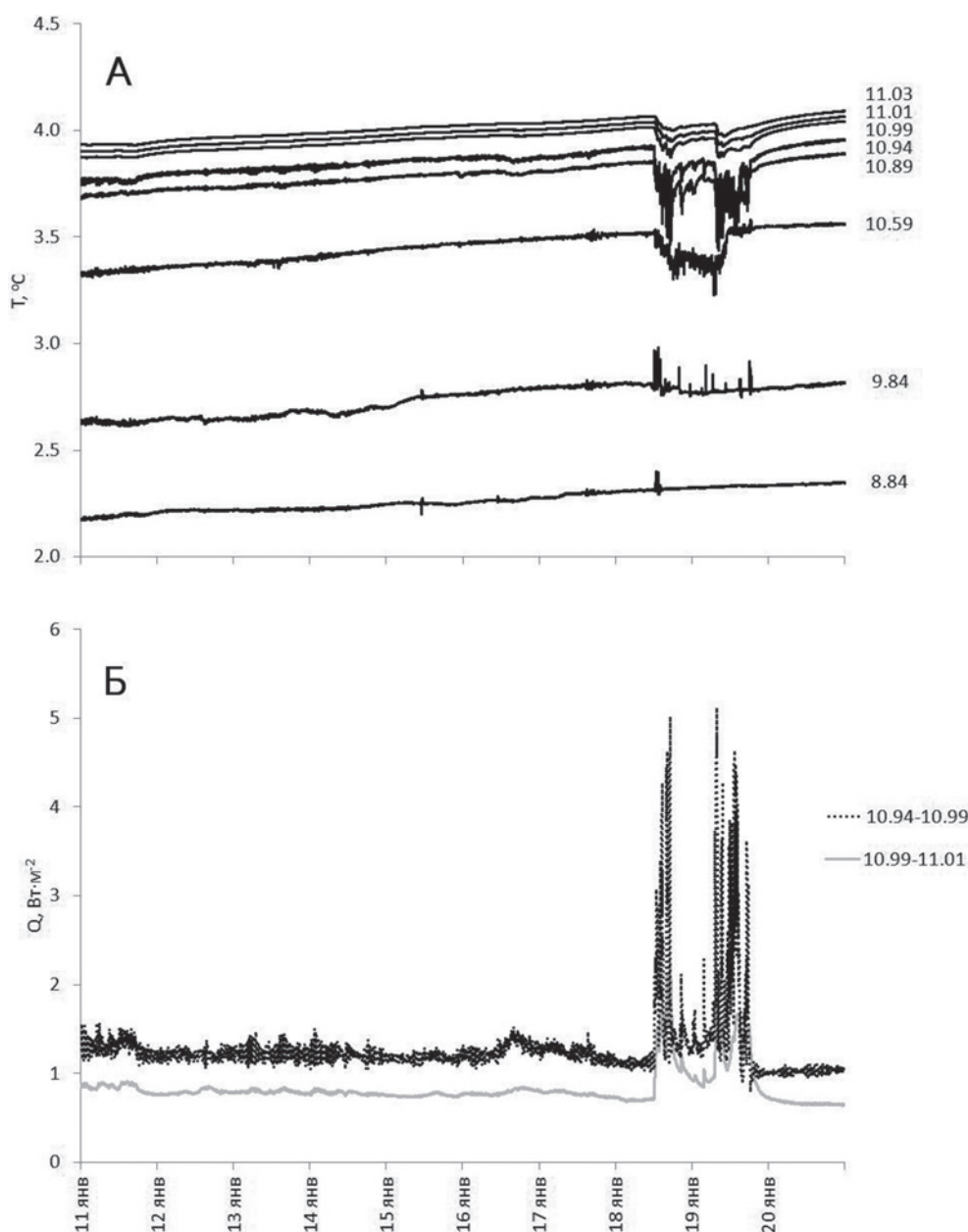


Рис. 3. Температура придонных слоев центральной глубоководной котловины оз. Вендюрского (А) и теплоток в придонных слоях воды (Б) в период с 11 по 20 января 2015 г. Цифрами указаны глубины, м. Данные термокосы

котловины также фиксировались неоднократно за сезон.

Пульсации температуры в рамках стандартных приближений можно рассматривать как индикатор перемещений слоев жидкости по вертикали. Анализ данных показал, что амплитуды пульсаций температуры изменяются во времени и по глубине в довольно широком диапазоне, при этом участки с «фоновыми» значениями на уровне в несколько тысячных градуса чередуются с интервалами, где величина ΔT возрастает на порядок и более (рис. 4, А). Было обнаружено, что значения ΔT в придонных слоях, как

правило, сопоставимы со значениями, характерными для основной толщи (рис. 4, А).

Расчеты вертикальных смещений и вертикальных скоростей по формулам 2 и 3 показали, что «фоновым» колебаниям температуры соответствовали вертикальные перемещения изотерм порядка одного миллиметра (рис. 4, Б) и вертикальных скоростей порядка $10^{-5} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ (рис. 4, В) – значения, вполне характерные для баротропной сейши и согласующиеся с зарегистрированными амплитудами колебаний льда (также порядка 1–2 мм), приведенными в работе [Malm et al., 1997]. В то же

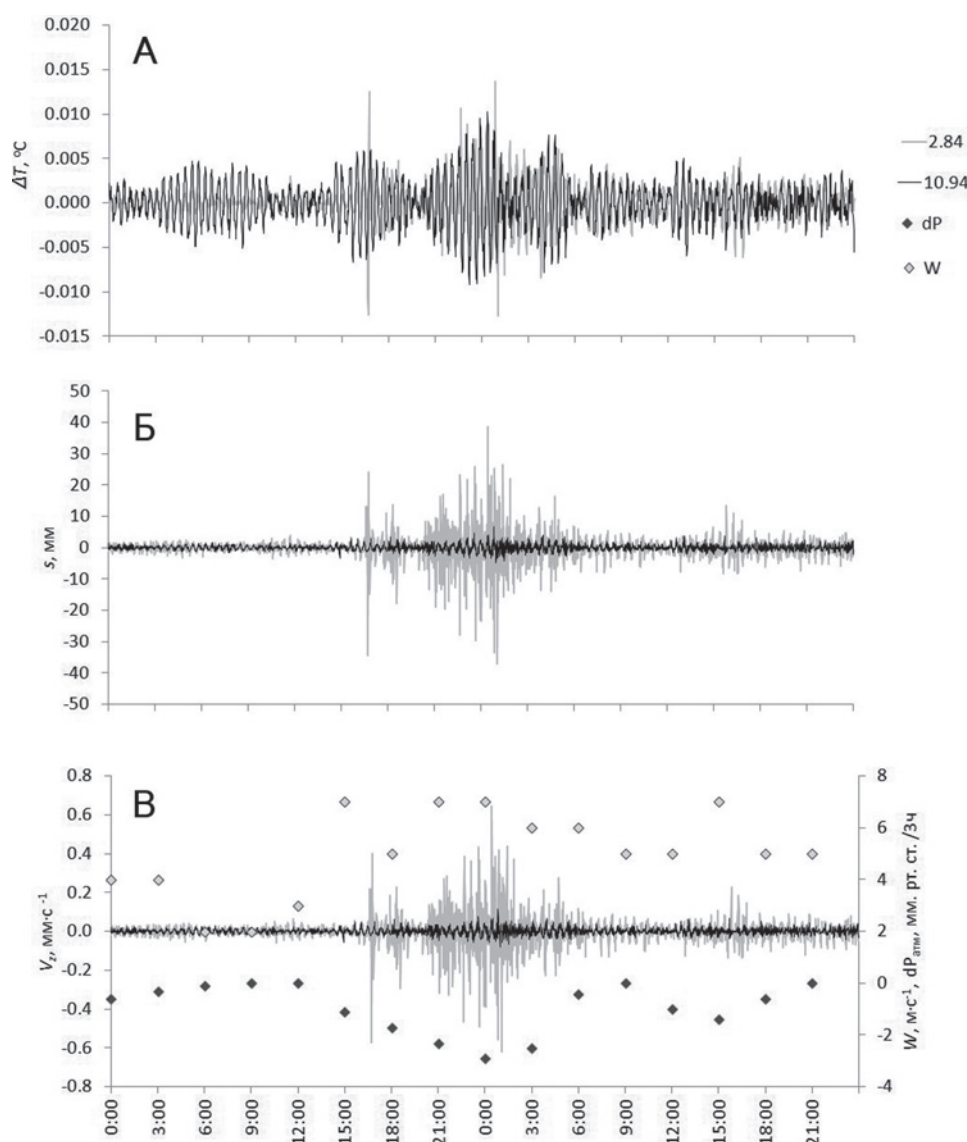


Рис. 4. Пульсации температуры воды (А), вертикальных смещений (Б) и вертикальной скорости (В) в поверхностном (2,84 м) и придонном (10,94 м) слоях водной толщи оз. Вендюрского 7–8 марта 2015 г. Цифрами указана глубина измерений, м. Данные термокосы. Скорость ветра (W) и барическая тенденция ($dP_{\text{атм}}$) по ГМС Петрозаводск

время «активным» интервалам с повышенной амплитудой пульсаций температуры соответствовали вертикальные перемещения вплоть до нескольких сантиметров, а в отдельных случаях – и более 10 см. Такие вертикальные перемещения как минимум на порядок превышают возможные значения в случае баротропной сейши. Вертикальные скорости на активных интервалах увеличивались на 1–2 порядка.

Интересно, что усиление пульсаций температуры, а следовательно, и вертикальных смещений и вертикальных скоростей происходило на фоне резких перепадов атмосферного давления и усилений ветра. В частности, приведенному на рис. 4 случаю соответствовало усиление скорости ветра до $7\text{--}8\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ с порывами

до $16\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ и резкое падение атмосферного давления – на $2\text{--}3\text{ мм рт. ст.}$ за 3 ч в период с 15 ч 7 марта 2015 г. до 6 ч утра 8 марта 2015 г. (рис. 4, В). В течение зимы 2014–2015 гг. неоднократно отмечалось возрастание амплитуд пульсаций температуры, а следовательно, и вертикальных смещений и вертикальных скоростей, наиболее выраженное в поверхностных слоях водной толщи. Такие усиления происходили на фоне резких изменений погоды – при скоростях ветра более $7\text{--}8\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ и перепадах атмосферного давления порядка $2\text{--}3\text{ мм рт. ст.}$ за 3 ч. При уменьшении скорости ветра высокочастотная изменчивость температуры в течение нескольких часов снижалась до «фоновых» значений.

В целом значительные колебания глубины залегания изотерм и характер зависимости амплитуды этих колебаний от вертикальной координаты позволяют предположить, что колебания в основном имеют бароклинную, а не баротропную природу, то есть могут быть обусловлены внутренними волнами в стратифицированном озере. До недавнего времени экспериментально подтвердить или опровергнуть существование внутренних волн не представлялось возможным в связи с отсутствием необходимых приборов. Однако с появлением высокочувствительного измерителя течений такая возможность у исследовательской группы появилась. И в ближайшем будущем планируется проведение синхронных измерений температуры воды и скоростей течения в покрытых льдом озерах, что позволит экспериментально проверить высказанное предположение.

Заключение

Анализ данных измерений температуры в небольшом мелководном озере Вендюрском позволил выявить новые особенности его теплового режима в зимний период. Характер изменения температурного профиля в первые дни ледостава и выполненные оценки эффективного коэффициента температуропроводности позволяют предполагать немоллекулярный характер теплопереноса. В течение зимнего сезона в водной толще от поверхностных до придонных слоев присутствовали колебания температуры широкого диапазона амплитуд и периодов. Анализ пульсаций температуры, а также оценки вертикальных смещений и вертикальных скоростей позволили обнаружить ряд особенностей, совершенно не характерных для баротропных сейш, в частности, зависимость колебаний от глубины. Показано, что атмосферное воздействие на озеро может приводить к усилению подледной гидродинамики и ускорению теплообмена.

В целом приведенные оценки позволяют сделать вывод о том, что процессы теплопереноса в покрытом льдом озере могут определяться мелкомасштабными пульсациями и в той или иной степени обусловлены турбулентной теплопроводностью. Предположительно, обрушение или взаимодействие внутренних волн, их неустойчивость как раз и могут служить причиной возникновения мелкомасштабной перемежающейся турбулентности, ускоряющей теплообмен в покрытом льдом озере.

Литература

- Бояринов П. М., Петров М. П. Процессы формирования термического режима глубоких пресноводных водоемов. Л.: Наука, 1991. 175 с.
- Гавриленко Г. Г., Здорovenнова Г. Э., Здорovenнов Р. Э. и др. Теплопоток на границе вода-донные отложения в небольшом озере // Труды КарНЦ РАН. 2015. № 9, С. 3–9.
- Здорovenнов Р. Э., Здорovenнова Г. Э., Пальшин Н. И., Терзевик А. Ю. Изменчивость термического и кислородного режимов мелководного озера зимой // Тр. КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 57–63.
- Литинская К. Д., Поляков Ю. К. Озера Вендюрской группы – Урос, Риндозеро, Вендюрское // Водные ресурсы Карелии и их использование. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1975. С. 57–66.
- Патент РФ № 1537877.07.2015.
- Петров М. П., Терзевик А. Ю., Здорovenнов Р. Э., Здорovenнова Г. Э. Особенности термической структуры мелководного озера в начале зимы // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 2. С. 154–162.
- Петров М. П., Терзевик А. Ю., Здорovenнов Р. Э., Здорovenнова Г. Э. Движения воды в мелководном озере, покрытом льдом // Водные ресурсы. 2007. Т. 34, № 2. С. 131–140.
- Bengtsson L., Svensson T. Thermal regime of ice-covered Swedish lakes // Nordic Hydrol. 1996. Vol. 27. P. 39–56.
- Golosov S., Zverev I., Terzhevik A. Modelling thermal structure and heat interaction between water column and bottom sediments in ice-covered lakes // Proc. 7th Workshop on Physical Processes in Natural Waters, A. Terzhevik (ed.). Petrozavodsk. 2003. P. 83–88.
- Kirillin G., Engelhardt C., Golosov S., Hintze T. Basin-scale internal waves in the bottom boundary layer of ice-covered Lake Muggelsee, Germany // Aquat Ecol. 2009. Vol. 43, no. 3. P. 641–651. doi:10.1007/s10452-009-9274-3
- Kirillin G., Leppäranta M., Terzhevik A. et al. Physics of seasonally ice-covered lakes: a review // Aquatic Sciences. 2012. 74 (4). P. 659–682.
- Malm J. Bottom buoyancy layer in an ice-covered lakes // Water Resources Research. 1998. Vol. 34, no. 11. P. 2981–2993.
- Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L. et al. Temperature and Hydrodynamics in Lake Vendurskoe during Winter 1995/1996. Department of Water Resources Engineering, Institute of Technology. University of Lund, 1997. No. 3213. 203 p.
- Mortimer C. H., Mackereth F. J. H. Convection and its consequences in ice-covered lakes // Int. Ver. Theor. Angew. Limnol. Verh. 1958. No. 13. P. 923–932.
- Rizk W., Kirillin G., Leppäranta M. Basin-scale circulation and heat fluxes in ice-covered lakes // Limnol. Oceanogr. 2014. 59 (2). P. 445–464.
- Zdorovennova G. E. Spatial and temporal variations of the water-sediment thermal structure in shallow ice-covered Lake Vendyurskoe (Northwestern Russia) // Aquatic Ecology. 2009. Vol. 43. P. 629–639. doi: 10.1007/s10452-009-9277-0

Поступила в редакцию 17.02.2016

References

- Boyarinov P. M., Petrov M. P. Protsessyi formirovaniya termicheskogo rezhima glubokih presnovodnykh vodoemov [Formation processes of thermal regime in deep freshwater bodies]. Leningrad: Nauka, 1991. 175 p.
- Gavrilenko G. G., Zdorovenнова G. E., Zdorovennov R. E., Palshin N. I., Mitrokhov A. V., Terzhevik A. Yu. Teplopotok na granice voda-donnye otlozheniya v nebol'shom ozere [Heat flux at the water-sediment interface in a shallow lake]. *Trudy KarNC RAN [Trans. KarRC RAS]*. 2015. No. 9. P. 3–9.
- Zdorovennov R. E., Zdorovenнова G. E., Palshin N. I., Terzhevik A. Yu. Izmenchivost termicheskogo i kislorodnogo rezhimov melkovodnogo ozera zimoy [Variation of the temperature and oxygen regimes of a shallow lake in winter]. *Trudy KarNC RAN [Trans. KarRC RAS]*. 2011. No. 4. P. 57–63.
- Litinskaya K. D., Polyakov Yu. K. Ozera Vendyurskoj gruppy – Uros, Rindozero, Vendyurskoe [Lakes of Vendyury group – Uros, Rindozero and Vendyurskoe]. In: *Vodnye resursy karelii i ih ispolzovanie [Water resources of Karelia and their use]*. Petrozavodsk: Karelskij filial AN SSSR, 1975. P. 57–66.
- Patent RF № 153787. 7.07.2015.
- Petrov M. P., Terzhevik A. Yu., Zdorovennov R. E., Zdorovenнова G. E. Osobennosti termicheskoy struktury melkovodnogo ozera v nachale zimy [The thermal structure of a shallow lake in early winter]. *Vodnye resursy [Water resources]*. 2006. Vol. 33, no. 2. P. 154–162.
- Petrov M. P., Terzhevik A. Yu., Zdorovennov R. E., Zdorovenнова G. E. Dvizheniya vody v melkovodnom ozere pokrytom ldom [Motion of water in an ice-covered shallow lake]. *Vodnye resursy [Water resources]*. 2007. Vol. 34, no. 2. P. 131–140.
- Bengtsson L., Svensson T. Thermal regime of ice-covered Swedish lakes. *Nordic Hydrol.* 1996. Vol. 27. P. 39–56.
- Golosov S., Zverev I., Terzhevik A. Modelling thermal structure and heat interaction between water column and bottom sediments in ice-covered lakes. Proc. 7th Workshop on Physical Processes in Natural Waters, A. Terzhevik (ed.). Petrozavodsk. 2003. P. 83–88.
- Kirillin G., Engelhardt C., Golosov S., Hintze T. Basin-scale internal waves in the bottom boundary layer of ice-covered Lake Muggelsee, Germany. *Aquat. Ecol.* 2009. Vol. 43, no. 3. P. 641–651. doi: 10.1007/s10452-009-9274-3
- 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. 74 (4). P. 659–682.
- Malm J. Bottom buoyancy layer in an ice-covered lakes. *Water Resources Research*. 1998. Vol. 34, no. 11. P. 2981–2993.
- Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinitsky A., Palshin N., Petrov M. Temperature and Hydrodynamics in Lake Vendurskoe during Winter 1995/1996. Department of Water Resources Engineering, Institute of Technology. University of Lund, 1997. No. 3213. 203 p.
- Mortimer C. H., Mackereth F. J. H. Convection and its consequences in ice-covered lakes. *Int. Ver. Theor. Angew. Limnol. Verh.* 1958. No. 13. P. 923–932.
- Rizk W., Kirillin G., Leppäranta M. Basin-scale circulation and heat fluxes in ice-covered lakes. *Limnol. Oceanogr.* 2014. 59 (2). P. 445–464.
- Zdorovenнова G. E. Spatial and temporal variations of the water-sediment thermal structure in shallow ice-covered Lake Vendyurskoe (Northwestern Russia). *Aquatic Ecology*. 2009. Vol. 43. P. 629–639. doi: 10.1007/s10452-009-9277-0

Received February 17, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Здорovenнова Галина Эдуардовна

и. о. зав. лабораторией гидрофизики, к. г. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: zdorovennova@gmail.com
тел.: 89116660369

Здорovenнов Роман Эдуардович

старший научный сотрудник лаборатории гидрофизики,
к. г. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: romga74@gmail.com
тел.: 89212209438

CONTRIBUTORS:

Zdorovennova, Galina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: zdorovennova@gmail.com
tel.: 89116660369

Zdorovennov, Roman

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: romga74@gmail.com
tel.: 89212209438

Пальшин Николай Иннокентьевич

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

Ефремова Татьяна Владимировна

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

Гавриленко Галина Геннадиевна

младший научный сотрудник лаборатории гидрофизики
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: south.sun.cr@gmail.com
тел.: 89602115561

Богданов Сергей Рэмович

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

Терзевик Аркадий Юрьевич

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

Palshin, Nikolai

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

Efremova, Tatyana

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

Gavrilenko, Galina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: south.sun.cr@gmail.com
tel.: 89602115561

Bogdanov, Sergey

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

Terzhevik, Arkady

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

УДК 556.512

ВЛИЯНИЕ РУБОК НА СТОК С ЛЕСОПОКРЫТОЙ ЧАСТИ ВОДОСБОРА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

Ю. В. Карпечко

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Хозяйственная деятельность на водосборах рек и озер оказывает заметное влияние на формирование водных ресурсов. Около 65 % водосбора Онежского озера занято лесом, поэтому лесохозяйственные и лесопромышленные работы играют важную роль в формировании стока с него. По опубликованным данным установлены характеристики произрастающего на водосборе древостоя и площади, планируемые под сплошные рубки. Приведены определения понятий коренного и производного леса. Отмечено, что временная изменчивость стока с коренного леса обуславливается только метеорологическими характеристиками; сток с производного леса в большой степени зависит от антропогенных факторов. Предложено антропогенную составляющую стока определять по разнице между фактическим стоком и стоком, который бы сформировался с этого же водосбора, но занятого коренным лесом. Отмечена близость по условиям формирования водного баланса между коренными и спелыми производными лесами. Рассчитано, что за счет большего испарения фактический сток с производного леса меньше стока, сформированного на том же водосборе, но в спелых и перестойных лесах. Это объясняется омоложением древостоя и большей интенсивностью процессов в молодом древостое. Площадь водосбора Онежского озера, с которой возможно удаление древостоя сплошными рубками, составляет около 244 км². Для оценки изменения стока после сплошных рубок использовалась разработанная ранее методика. Получены данные, что общее увеличение годового стока с водосбора в первый год после сплошных рубок может достигать 49,4 млн м³.

Ключевые слова: коренные и производные леса; сплошные рубки; испарение; сток.

Yu. V. Karpechko. LOGGING EFFECTS ON RUNOFF FROM THE FORESTED PART OF THE CATCHMENT OF LAKE ONEGA

Human activity in the catchments of rivers and lakes produces significant influence on the formation of water resources. About 65 % of the Lake Onega catchment area is occupied by forest, so forest management plays an important role in the formation of runoff from it. The characteristics of the stand growing in the catchment and areas designated for clear cutting were determined from published data. The definitions are given for the concepts of old-growth (primary) and secondary forest. It is remarked that the temporal variability of runoff from old-growth forests is controlled by meteorological conditions only, whereas runoff from secondary forests significantly depends on anthropogenic factors. It is proposed to estimate the anthropogenic component in runoff as the difference between the actual flow and the flow that would have come from the same catchment area had it been covered in old-growth forest. It is noted that there is high similarity in the formation of the water balance between old-growth and mature secondary forests. Our calculations

show that owing to greater evaporation actual runoff from a secondary forest is lower than runoff from mature and overmature forests in the same catchment. This situation is due to stand rejuvenation and a higher rate of processes in a young stand. The area where removal of the stand by clear cuttings is possible in the catchment of Lake Onega is about 244 km². To estimate how clear cutting would modify the runoff a previously developed technique was used. The resultant data show that the total increase in annual runoff from the catchment in the first year after clear cutting may reach 49.4 million m³.

Key words: old-growth and secondary forests; clear cuttings; evaporation; runoff.

Введение

Оценки влияния антропогенных факторов на водные ресурсы, полученные для различных природных условий, позволят более рационально и обоснованно с точки зрения экологии и экономики планировать деятельность человека.

Большая часть водосбора Онежского озера занята лесом, где основными видами хозяйственной деятельности являются лесохозяйственные и лесопромышленные работы, включающие различные рубки, поэтому важную задачу составляет оценка их влияния на формирование стока. Целью данной работы является получение величины возможного изменения годового стока после ежегодных рубок в объеме расчетной лесосеки и оценка влияния возрастной структуры древостоя, сформировавшейся в результате многолетних лесозаготовок, на величину годового стока.

Характеристика лесопокрытой части водосбора Онежского озера

В зависимости от роли различных факторов в формировании и функционировании лесных экосистем, а также от временной структуры древостоя все леса таежной зоны можно разделить на коренные (девственные) и производные. К коренным относят те лесные экосистемы, которые длительное время (более 300 лет) не подвергались воздействию антропогенных и природных катастрофических факторов (рубки, ветровалы, массовое размножение вредителей, пожары и т. д.). Из приведенных в литературе определений [Волков, 1999] следует, что коренные леса представляют собой относительно устойчивую фазу естественного развития лесных сообществ, наиболее соответствующую экологическим условиям данной местности и в данный геологический период. Устойчивость в функционировании этих экосистем позволяет сделать вывод, что в однотипных коренных лесах вариации испарения и стока связаны в большей степени

с колебаниями метеорологических и климатических характеристик. Антропогенные факторы могут опосредованно проявляться через процессы в атмосфере, влияющие, в частности, на температуру воздуха и осадки.

Нарушенные хозяйственной деятельностью или природными факторами коренные леса называют производными. На большей части производных лесов ведутся лесозаготовительные работы, среди которых по своим последствиям выделяются сплошные рубки. Такими рубками с конкретного участка полностью удаляется древостой. Их ежегодное повторение на достаточно крупном (относительно площади ежегодных рубок) водосборе приводит к созданию на нем лесных участков, характеризующихся различием возраста растущего древостоя. Поскольку существует зависимость испарения и стока от возраста древостоя [Карпечко, Бондарик, 2010], то доля вклада в общий сток каждого из этих участков будет различной.

В настоящее время большая часть древесины заготавливается выборочными рубками. В этом случае кардинальных преобразований растительного покрова на лесосеке не происходит, однако меняются полнота, состав и возрастная структура древостоя, что отражается на формировании испарения и стока, хотя и в меньшей степени, чем после сплошных рубок.

Лесной фонд водосбора находится в ведении лесохозяйственных организаций Республики Карелия, Архангельской, Вологодской и Ленинградской областей. Карельская часть лесного фонда расположена на территориях семи центральных лесничеств, и характеристики этой категории земель и древостоя приведены в Интернете [Лесной план..., Лесохозяйственные регламенты...]. На водосборе находится национальный парк «Водлозерский» (особо охраняемая природная территория). Отведенная под парк площадь земель лесного фонда на территории Карелии составляет 1271,08 км², а остальная часть парка (3410,85 км²) расположена в Архангельской области. Информация о лесном фонде

Таблица 1. Лесистость и некоторые характеристики лесопокрытой части водосбора Онежского озера

Водосбор	Площадь, км ²			Лесистость, %
	Лесопокрытая	Хвойные	Лиственные	
53 100	36 320,4	29 056,32	7 264,08	68

Таблица 2. Распределение площади (км²) и запасов древесины (тыс. м³) на лесопокрытой части водосбора Онежского озера по группам пород и по группам возраста

Показатели	Всего	Молодняки	Средневозрастные	Приспевающие	Спелые и перестойные	В том числе перестойные
Хвойные						
Площадь	29 056,32	10 899,48	6 577,08	2 222,79	9 356,97	4 805,1
Запас	328 272,2	49 334,53	77 320,35	39 783,67	161 833,7	72 314,79
Лиственные						
Площадь	7 264,08	1 269,06	2 948,01	840,63	2 206,38	1 260,8
Запас	81 417,5	4 781,4	23 243,2	9 363,9	44 029,1	15 674,1

национального парка, использованная для определения общей лесистости и характеристик древостоя водосбора озера, взята из [Ананьев и др., 2006]. В Вологодской области земли водосбора Онежского озера входят в центральное лесничество Вытегорское [Лесной план..., Лесохозяйственные регламенты...]. Доля земель Ленинградской области, входящих в водосбор собственно Онежского озера (без учета Ивинского разлива), небольшая, поэтому при оценке характеристик лесопокрытой части водосбора не учитывалась.

Земли большинства центральных лесничеств выходят за пределы водосборной площади. В этой связи при определении лесистости и различных характеристик леса для водосборной территории всего озера было принято, что все интересующие нас показатели лесного фонда распределены по площади лесничества равномерно. Это позволяет принимать искомые характеристики леса всего водосбора озера, с некоторыми погрешностями, как среднеарифметические величины из данных по лесничествам. Поскольку в водосборную площадь входит большая часть рассматриваемых центральных лесничеств и на их территориях изменчивость определяемых показателей невелика, то можно полагать, что получаемые таким образом величины достаточно точно характеризуют лесопокрытую часть водосбора Онежского озера (табл. 1).

Водосбор Онежского озера расположен в таежной зоне, поэтому древесная растительность представлена в основном хвойными породами (около 80 %), и, соответственно, около 20 % лесопокрытой территории занимают лиственные породы. Среди хвойных пород с небольшим «перевесом» преобладает сосна. На ее долю приходится около 58 %

занятой хвойными породами территории. Лиственные породы представлены в основном березняками.

На значительной части лесного фонда водосбора Онежского озера интенсивно велись лесозаготовительные работы, поэтому среди хвойных пород преобладают молодняки, хотя немалая часть площади занята спелым и перестойным лесом (табл. 2). Среди этой возрастной группы достаточно большая территория занята перестойным древостоем, к которому относятся и коренные леса.

Интенсивные временные изменения гидрофизических и гидрологических процессов, а также условий формирования химического состава стекающих с водосборов вод происходят в молодняках и средневозрастных лесах [Карпечко, Бондарик, 2010]. Наибольшие запасы древесины, конечно, сконцентрированы на участках, занятых спелым и перестойным древостоем.

Рубки в производных лесах в зависимости от их вида служат для решения различных задач: уход за лесом и заготовка древесины. Правила их выполнения описаны в Лесном кодексе, в приложениях к нему и в соответствующих региональных документах [Лесной кодекс..., 2016]. Планируемый размер площадей для выполнения рубок ухода составляет 0,6–0,8 % от лесопокрытой площади, при этом фактический объем работ ограничивается часто меньшими показателями. Так, в 2014 году в Карелии уход за лесом был выполнен на площади, составляющей 26 % от планируемой [Государственный доклад..., 2015].

Задачу по заготовке древесины решают выборочными и сплошными рубками. К выборочным относятся те рубки, при которых на соответствующих землях или земельных участках

Таблица 3. Планируемые ежегодные площади сплошных рубок и объемы заготавливаемой при этом древесины в пределах водосбора Онежского озера

Всего		Хвойный		Лиственный		Доля от лесопокрытой		
площадь	объем	площадь	объем	площадь	объем	всего	хв.	лист.
га	тыс. м ³	га	тыс. м ³	га	тыс. м ³	%	%	%
24435	4380	16533	2970	7902	1391	0,67	0,46	0,22

вырубается часть деревьев и кустарников. Эти рубки различаются между собой по объему вырубемой древесины (интенсивности) и по технологии производства работ. Важным при оценке гидрологической роли выборочных рубок является правило, в соответствии с которым обеспечивается формирование устойчивых лесных насаждений из второго яруса и подроста и исключается полная очистка даже небольших площадей от древостоя.

Наибольший преобразовательный эффект гидрологических процессов на участке леса происходит после сплошных рубок. При проведении сплошных рубок удаляются полностью спелые и перестойные лесные насаждения на площади, не превышающей 50 га. На созданных вырубках кардинально меняется интенсивность биологических, гидрофизических и гидрологических процессов, поэтому такие рубки следует относить к основным факторам, определяющим роль человека в формировании количественных характеристик стока и химического состава стекающей с водосбора воды.

В большинстве случаев возраст рубок сосняков и ельников принимают в зависимости от класса бонитета в пределах от 81 до 100 лет, а березняков – от 61 до 70 лет. После рубки на лесном участке начинаются процессы, аналогичные происходящим после предыдущего удаления древостоя на той же самой лесосеке.

Для поддержания условий устойчивого и неистощимого лесопользования количество заготавливаемой древесины в конкретном регионе должно соответствовать расчетной лесосеке (объем вырубемого древостоя), для определения которой существуют различные подходы. Основой всех этих подходов является установление соответствия между объемами вырубемого и прирастающего древостоя.

Площади ежегодных сплошных рубок и объемы вырубемой древесины для водосбора Онежского озера устанавливались нами по лесохозяйственным регламентам лесничеств [Лесохозяйственные регламенты...]. Вычисленные величины площадей сплошных рубок для всего водосбора Онежского озера с учетом допущений, указанных выше, приведены в таблице 3.

Следует отметить, что ежегодные рубки из-за незначительного их объема на водосборе не оказывают заметного влияния на гидрофизические и гидрологические процессы. Однако при выполнении этих работ в течение продолжительного времени на водосборе создается определенная возрастная структура древостоя, обуславливающая формирование элементов водного баланса и химического состава стекающей воды. Наиболее заметны последствия рубок на стоке в первые 20 лет [Карпечко, Бондарик, 2010]. Близкая к этой величине продолжительность периода с пониженным стоком (18 лет) указана в работе [Ide et al., 2013]. Нужно отметить, что часть этого периода лишенная древостоя вырубка не относится к лесопокрытой площади.

Изменение стока в первый год после сплошных рубок

Максимальное снижение суммарного испарения и максимальное увеличение стока наблюдаются, как правило, в первый год после рубок ухода, выборочных и сплошных. Наиболее значительными последствиями характеризуются, как отмечено выше, сплошные рубки, поэтому оценки изменения для данного года величин этих элементов водного баланса из-за масштабов преобразований представляют наибольший интерес.

Результаты исследований изменения стока после полного удаления древостоя, проводимых в различных районах лесной зоны (от тайги до тропических лесов), свидетельствуют о возможном увеличении стока до 90 % [Bosch, Hewlett, 1982]. Из данных наблюдений в лесах России и выполненных расчетов следует, что после сплошных рубок испарение в продуктивных лесах снижается на 50–60 % [Крестовский, 1986; Карпечко, Мясникова, 2014].

В первый год после рубок, продолжительность которых на конкретной лесосеке в соответствии с правилами не должна превышать 12 месяцев, растительный покров по своему составу и массе мало отличается от того, который произрастал под кронами древостоя. На этом основана оценка происходящих изменений испарения и стока в предложенном в работе

Таблица 4. Изменение стока после сплошных рубок на водосборе Онежского озера

Характеристика	Сосняк		Ельник		Березняк	
	мм	млн м ³	мм	млн м ³	мм	млн м ³
Изменение стока	159	13,7	187	14,1	274	21,6
Сток с вырубки	484	41,6	516	38,9	522	41,2

[Карпечко, Мясникова, 2014] методе. С использованием данного метода выполнялась работа для водосбора Онежского озера.

Искомая величина (изменение испарения после рубок) представляет собой разницу между испарением с вырубки (E_{cl}) и испарением с леса до воздействия (E_f):

$$dE = E_{cl} - E_f \quad (1)$$

Годовое суммарное испарение с леса рассчитывается по уравнению [Крестовский, 1986; Карпечко, Бондарик, 2010]:

$$E_f = E_t + E_i + E_s, \quad (2)$$

где E_t – транспирация древостоя; E_i – испарение задержанных пологом леса атмосферных осадков; E_s – испарение с наземного покрова.

Методы определения составляющих суммарного испарения и всех необходимых для их расчетов параметров приведены в различных публикациях, в том числе в [Карпечко, Бондарик, 2003; Карпечко, Бондарик, 2010; Карпечко, Мясникова, 2014].

Испарение непосредственно с вырубки предлагается определять с использованием следующего равенства:

$$E_{cl} = k_s E_s, \quad (3)$$

где k_s – переходный коэффициент от испарения под пологом леса к испарению с вырубки.

После подстановки (2) и (3) в (1) и простых преобразований получается уравнение для оценки изменения испарения после воздействия:

$$dE = E_s (k_s - 1) - (E_t + E_i). \quad (4)$$

Изменение годового стока в лесах водосбора Онежского озера оценивалось соответственно по следующему уравнению:

$$dY = - (E_s (k_s - 1) - (E_t + E_i)). \quad (5)$$

Для определения переходного коэффициента (k_s) в [Карпечко, Мясникова, 2014] предложена следующая зависимость:

$$k_s = \exp(0,18LA/I). \quad (6)$$

Расчеты изменения стока после сплошных рубок для водосбора Онежского озера выполнялись с учетом данных, приведенных в таблице 3, и осредненных по всему водосбору

метеорологических характеристик. Результаты расчета приведены в таблице 4.

Следовательно, общее увеличение годового стока с водосбора Онежского озера в первый год после рубок в соответствии с планами лесозаготовок на ближайшее десятилетие за счет сплошных рубок может достигать 49,4 млн м³. Такое увеличение притока в озеро равносильно появлению новой реки с площадью водосбора около 150 км².

Оценка антропогенной составляющей стока

После лесовосстановления на вырубках хвойный лес в своем росте и развитии проходит следующие стадии: молодняки (1–40 лет), средневозрастные (41–80 лет), приспевающие (81–100 лет), спелые (101–140 лет) и перестойные (более 141 года) [Лесной кодекс, 2016]. От начала зарастания деревьями вырубки и до возраста, характеризующегося наиболее интенсивными физиологическими процессами, происходит рост испарения и снижение стока с этого участка. На водосборе Онежского озера в зависимости от лесорастительных условий максимальное испарение с леса, основную часть которого составляет транспирация, можно ожидать в возрасте от 70 до 120 лет в хвойном и от 50 до 80 лет в лиственном древостое. С ухудшением продуктивности леса отмечается смещение максимального за период роста и развития леса в сторону старшего возраста. Со спелого леса испарение снижается, и минимальных значений оно достигает в перестойном древостое, составляющем основу коренного леса, характеризующегося стабилизацией всех протекающих в нем процессов [Карпечко, Бондарик, 2010]. Промышленные заготовки древесины на водосборе озера проводят, в соответствии с рекомендациями, в спелых лесах.

Антропогенная составляющая стока с лесного участка определяется разницей между величиной стока, сформированного в условиях существующего состояния лесного участка, и его величиной, которая бы сформировалась при условии, что данная площадь покрыта коренным лесом.

Использованное для определения искомой величины выражение основано на решении

уравнений водного баланса относительно стока для существующего леса и для условий коренного леса. Это выражение, элементы которого представлены в объемных единицах, имеет следующий вид [Карпечко, Бондарик, 2010]:

$$W_{an} = -\sum (F_{for\ i\ m} E_{i\ f}) / 10^8 + F_{for} E_{mat} / 10^8, \quad (7)$$

где W_{an} – антропогенная составляющая стока за год с лесопокрытой площади, км³; $F_{for\ i\ m}$ – площадь лесного фонда, занятая i -й породой древостоя, осредненного для расчетной площади возраста, га; F_{for} – лесопокрытая площадь лесного фонда, га; $E_{i\ f}$ – годовое испарение с площади лесного фонда, занятой i -й породой древостоя, осредненного для всей расчетной площади возраста, мм; E_{mat} – годовое средневзвешенное испарение со спелого и перестойного елового и соснового древостоя, мм.

Годовое суммарное испарение с площади лесного фонда, занятой i -й породой древостоя, осредненного для всей расчетной площади возраста, рассчитывалось по формуле (2). При расчете использовалась информация, приведенная в таблицах 1 и 2. Следует отметить, что поскольку рубки ухода и выборочные рубки не выводят лесосеки из лесопокрытой части лесного фонда, то их таксационные характеристики учитываются в приведенных в таблицах данных. Следовательно, гидрологическая роль этих видов деятельности также учитывается при расчете по (7).

Из-за отсутствия информации о распределении по площади разных по возрасту пород древостоя в расчетах использовали осредненный для каждой породы по исследуемой территории возраст. Сток с леса определялся дифференцированно с учетом вклада каждой породы.

Коренные леса могут между собой различаться по возрастной структуре, однако, как показано многими исследователями, в частности А. Д. Волковым [1999] и В. А. Ананьевым с коллегами [2006], основной запас древесины формируется из спелого и перестойного древостоя. Следовательно, древостой этих возрастных групп определяет формирование водного баланса на участках коренного леса. Этот вывод подтверждается расчетами для сосняка брусничного и ельника черничного, показывающими практическое соответствие для однотипных древостоев величин испарения с коренных лесов с одной стороны и спелых, а также перестойных производных лесов с другой стороны [Карпечко, Бондарик, 2010]. О близости перестойных лесов к коренным с экологической точки зрения указано в работе [Романюк и др.,

2009]. Следовательно, отсутствующие в материалах лесоустройств данные о коренных лесах можно при расчетах по (7) заменить информацией о спелых и перестойных лесах. Полученная по (7) величина представляет собой как абсолютную (разница между стоком с растущего леса и стоком с коренного леса), так и относительную (разница между стоком с растущего леса и стоком со спелого леса перед рубкой) оценку изменения стока после рубок [Карпечко, Бондарик, 2010].

Поскольку основой растительной жизни тайги являются хвойные породы древостоя, а появление лиственных пород связано в большей степени с деятельностью человека, то при расчете испарения, характеризующего коренные леса, использовались только данные, полученные для сосняков и ельников. В качестве расчетной величины принималось средневзвешенное испарение с учетом площади, занимаемой каждой из этих пород.

Расчеты выполнялись для каждого из лесничеств, для водосбора Онежского озера принималась среднеарифметическая из полученных результатов величина антропогенной составляющей стока.

Для всех лесничеств отмечено снижение годового стока с лесопокрытой территории из-за деятельности человека. Это обусловлено тем, что лесопромышленные работы приводят к омоложению древостоя. В лесу увеличивается доля деревьев, характеризующихся более интенсивными физиологическими процессами, в том числе более интенсивным потреблением минеральных веществ из почвы и интенсивной транспирацией, составляющей большую часть суммарного испарения с леса. Для всех лесничеств величина снижения испарения меняется от –5 до –25 мм. В среднем для лесопокрытой части водосбора Онежского озера величину антропогенной составляющей стока можно принять равной –16 мм. В объемных единицах отрицательное влияние лесозаготовительной деятельности на водные ресурсы для исследуемой территории составляет около 0,6 км³. Эта величина соответствует водности реки с площадью водосбора около 1700–1800 км².

Заключение

Лесистость водосбора Онежского озера, определенная по опубликованным в Интернете лесохозяйственным регламентам, составляет около 65 %. Большая часть лесопокрытой территории представлена хвойными породами (около 80 %). Среди них преобладает сосна, на долю которой приходится около 58 %

занятой хвойными породами территории. Лиственные породы представлены в основном березняками.

Наибольший преобразовательный эффект гидрологических процессов на участке леса происходит после сплошных рубок, при проведении которых удаляются полностью спелые и перестойные лесные насаждения на площади, не превышающей 50 га. На созданных вырубках кардинально меняется интенсивность биологических, гидрофизических и гидрологических процессов, поэтому эти рубки следует относить к основным факторам, определяющим роль человека в формировании количественных характеристик стока и химического состава стекающей с водосбора воды. После рубок происходит резкое снижение испарения и увеличение стока. Для водосбора Онежского озера в первый год после рубок это увеличение стока, согласно расчетам, в среднем составляет 210 мм, при этом в объемных единицах приток в озеро возрастает на 49,4 млн м³.

Рост и развитие древостоя после лесовосстановления на вырубках сопровождается увеличением испарения до возраста леса, характеризованного максимальной интенсивностью физиологических процессов в древесной растительности. В спелом лесу испарение снижается, и минимальных значений оно достигает в коренном лесу, состоящем в большой степени из перестойных деревьев и характеризующемся стабилизацией всех протекающих в нем процессов. Лесозаготовительная деятельность приводит к омоложению древостоя, следовательно, к увеличению той его доли, которая характеризуется более интенсивной транспирацией, составляющей основную часть суммарного испарения с леса. Увеличение испарения сопровождается снижением стока с лесного участка. В среднем для лесопокрывной части водосбора Онежского озера величину антропогенной составляющей стока можно принять равной –16 мм. В объемных единицах отрицательное влияние лесозаготовительной деятельности на водные ресурсы для исследуемой территории составляет около 0,6 км³.

Литература

Ананьев В. А., Раевский Б. В., Грабовик С. И. Коренные еловые леса национального парка «Водлозерский»: структура, динамика и состояние // Водлозерские чтения: Естественнонаучные и гуманитарные основы природоохранной, научной и просветительской деятельности на охраняемых природных

территориях Русского Севера. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2006. С. 88–93.

Волков А. Д. Сравнительная оценка экологической роли и биологической специфики коренных и производных лесов северо-запада таежной зоны России // Коренные леса таежной зоны Европы: современное состояние и проблемы сохранения. Петрозаводск: СДВ-ОПТИМА, 1999. С. 9–16.

Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2014 году. Петрозаводск: Verso, 2015. 272 с.

Карпечко Ю. В., Бондарик Н. Л. Гидрологическая роль лесохозяйственных и лесопромышленных работ в таежной зоне Европейского Севера России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 225 с.

Карпечко Ю. В., Мясникова Н. А. Оценка изменения элементов водного баланса в первый год после рубок в таежной зоне Европейского Севера России // Уч. зап. Рос. гидромет. ун-та. 2014. № 33. С. 31–44.

Крестовский О. И. Влияние вырубок и восстановления лесов на водность рек. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 118 с.

Лесной кодекс РФ (ЛК) 2016 [Электронный ресурс]. URL: <http://leskod.ru/> (дата обращения: 03.01.2016).

Лесной план Вологодской области // Департамент лесного комплекса Вологодской области [Электронный ресурс]. URL: http://www.forestvologda.ru/page/wood_plan (дата обращения: 25.12.2015)

Лесной план Республики Карелия // Карелия официальная [Электронный ресурс]. URL: <http://gov.karelia.ru/gov/Legislation/lawbase.html?lid=12412> (дата обращения: 25.12.2015).

Лесохозяйственные регламенты лесничеств Вологодской области до 2018 года // Департамент лесного комплекса Вологодской области [Электронный ресурс]. URL: http://www.forestvologda.ru/page/regulations_of_forest_areas (дата обращения: 25.12.2015).

Лесохозяйственные регламенты центральных лесничеств Карелии на 2012–2021 годы // Карелия официальная [Электронный ресурс]. URL: http://gov.karelia.ru/gov/Power/Committee/Forest/lh_regl21.html (дата обращения: 25.12.2015).

Романюк Б. Д., Загидуллина А. Т., Книзе А. А. Природоохранное планирование ведения лесного хозяйства. СПб.: WWF России, 2009. 32 с.

Bosch J. M., Hewlett J. D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration // J. of Hydrology, 1982, 55, p. 3–23.

Ide J., Finer L., Lauren A., Piirainen S., Launainen S. Effects of clear-cutting on annual and seasonal runoff from a boreal forest catchment in eastern Finland // Forest Ecology and Management. 2013. Vol. 304. P. 482–491.

Karpechko Yu. V., Bondarik N. L. Effect of potential warming on evapotranspiration from forest catchments in Karelia // Nordic Hydrology. 2003. Vol. 34, no. 3. P. 147–160.

Поступила в редакцию 20.01.2016

References

- Anan'ev V. A., Raevskij B. V., Grabovik S. I. Korennye elovye lesa nacional'nogo parka "Vodlozerskij": struktura, dinamika i sostojanie [Indigenous spruce forests of the "Vodlozersky" national Park: structure, dynamics and status]. *Vodlozerskie chtenija: Estestvennonauchnye i humanitarnye osnovy prirodoohrannoj, nauchnoj i prosvetitel'skoj dejatel'nosti na ohranjaemyh prirodnyh territorijah Russkogo Severa* [Vodlozero readings: scientific and humanitarian basis of environmental and educational activities on the protected areas of Russian North]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2006. P. 88–93.
- Volkov A. D. Sravnitel'naja ocenka jekologicheskoi roli i biologicheskoi specifiky korennyh i proizvodnyh lesov severo-zapada taezhnoj zony Rossii [Comparative assessment of the ecological role and biological specificity of indigenous and derived forests of the Northwest Russian taiga]. *Korennye lesa taezhnoj zony Evropy: sovremennoe sostojanie i problemy sohraneniya* [Indigenous forests of the European taiga: current condition and conservation problems]. Petrozavodsk: SDV-OPTIMA, 1999. P. 9–16.
- Gosudarstvennyj doklad o sostojanii okruzhajushhej sredy respubliky Karelija v 2014 godu [State report on the condition of the environment of the Republic of Karelia in 2014]. Petrozavodsk: Verso, 2015. 272 p.
- Karpechko Ju. V., Bondarik N. L. Gidrologicheskaja rol' lesohozjajstvennyh i lesopromyshlennyh rabot v taezhnoj zone Evropejskogo Severa Rossii [Hydrological role of forest management and forestry industry activities in the taiga zone of Russian European North]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2010. 225 p.
- Karpechko Ju. V., Mjasnikova N. A. Ocenka izmeneniya jelementov vodnogo balansa v pervyj god posle rubok v taezhnoj zone Evropejskogo Severa Rossii [Estimation of water balance terms changes during the first year after logging in the taiga zone of the northern European Russia]. *Uch. zap. Ros. gidromet. un-ta* [Proc. Russ. State Hydrometeorological Univ.]. 2014. No. 33. P. 31–44.
- Krestovskij O. I. Vlijanie vyrubok i vosstanovleniya lesov na vodnost' rek [The effect of felling and reforestation on water resources of rivers]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. 118 p.
- Lesnoj kodeks RF (LK). 2016 [The forest code of the Russian Federation (LK)]. URL: <http://leskod.ru/> (accessed: 03.01.2016).
- Lesnoj plan Vologodskoj oblasti [The forest plan of the Vologda region]. Departament lesnogo kompleksa Vologodskoi oblasti [The department of forestry complex of the Vologda Region]. URL: http://www.forestvologda.ru/page/wood_plan (accessed: 25.12.2015).
- Lesnoj plan Respubliki Karelija [The forest plan of the Republic of Karelia]. *Karelija ofitsial'naya* [The official Karelia]. URL: <http://gov.karelia.ru/gov/Legislation/law-base.html?lid=12412> (accessed: 25.12.2015).
- Lesohozjajstvennye reglamenti lesnichestv Vologodskoj oblasti do 2018 goda [Forest management procedures of forest districts of the Vologda region up until 2018]. Departament lesnogo kompleksa Vologodskoi oblasti [The department of forestry complex of the Vologda Region]. URL: http://www.forestvologda.ru/page/regulations_of_forest_areas (accessed: 25.12.2015).
- Lesohozjajstvennye reglamenti lesnichestv Karelii na 2012–2021 gody [Forest management procedures of forest districts of Karelia for the years 2012–2021]. *Karelija ofitsial'naya* [The official Karelia]. URL: http://gov.karelia.ru/gov/Power/Committee/Forest/lh_regl21.html (accessed: 25.12.2015).
- Romanjuk B. D., Zagidullina A. T., Knize A. A. Prirodoohrannoe planirovanie vedeniya lesnogo hozjajstva [Environmental planning of forest management]. St. Petersburg: WWF Rossii, 2009. 32 p.
- Bosch J. M., Hewlett J. D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *J. of Hydrology*, 1982, 55, p. 3–23.
- Ide J., Finer L., Lauren A., Piirainen S., Launainen S. Effects of clear-cutting on annual and seasonal runoff from a boreal forest catchment in eastern Finland. *Forest Ecology and Management*. 2013. Vol. 304. P. 482–491.
- Karpechko Yu. V., Bondarik N. L. Effect of potential warming on evapotranspiration from forest catchments in Karelia. *Nordic Hydrology*. 2003. Vol. 34, no. 3. P. 147–160.

Received January 20, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Карпечко Юрий Васильевич
ведущий научный сотрудник, д. г. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: karp@nwpi.krc.karelia.ru
тел.: +79114101398

CONTRIBUTOR:

Karpechko, Yury
Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St. 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: karp@nwpi.krc.karelia.ru
tel.: +79114101398

УДК 551.465

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ С РАСЧЕТОМ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ WRF

Н. А. Дианский^{1,2,3}, В. В. Фомин^{1,3}, Т. Ю. Выручалкина^{3,4},
А. В. Гусев^{2,3}

¹ Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова

² Институт вычислительной математики РАН

³ Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

⁴ Институт водных проблем РАН

В работе описывается Система оперативного диагноза и прогноза (СОДИП) гидрометеорологических характеристик Каспийского моря. Она включает в себя расчет атмосферного воздействия по региональной негидростатической атмосферной модели Weather Research and Forecasting model (WRF), расчет течений, уровня, температуры, солености моря и морского льда по модели морской циркуляции INMOM (Institute Numerical Mathematics Ocean Model) и расчет параметров волнения по Российской атмосферно-волновой модели (РАВМ). Представлены результаты верификации расчетных гидрометеорологических характеристик, полученных с помощью СОДИП. Также с ее помощью выполнены ретроспективные расчеты термогидродинамических характеристик для Каспийского моря за безледный период с 2003 по 2013 г. Показаны важные особенности циркуляции вод Каспийского моря. Основной вклад в циркуляцию Каспийского моря делают ветровые течения. В частности, апвеллинг в восточной части Среднего Каспия обусловлен региональными ветрами северного направления. Установлено, что только в Южном Каспии наблюдается существенное различие течений, рассчитанных по разным моделям. Ветровые поля, рассчитанные в СОДИП с помощью негидростатической модели WRF и полученные по формулам геострофического ветра по полю давления из этой же модели, также хорошо согласованы в Среднем и Северном Каспии и существенно отличаются в Южном Каспии. Особенно это заметно у восточного и южного берегов, когда ветер, рассчитанный в WRF, направлен поперек изобар. Показано, что поля ветра и течений связаны. Для Каспийского моря необходимо использовать при расчете ветра негидростатические модели атмосферы типа WRF или COSMO.

Ключевые слова: Каспийское море; циркуляция океана; оперативное моделирование; численные методы; СОДИП.

N. A. Diansky, V. V. Fomin, T. Yu. Vyruchalkina, A. V. Gusev. NUMERICAL SIMULATION OF THE CASPIAN SEA CIRCULATION USING THE MARINE AND ATMOSPHERIC RESEARCH SYSTEM

The Marine and Atmospheric Research System (MARS) for simulation of the Caspian Sea meteorological characteristics is presented. It includes computation of the atmospheric forcing with the regional non-hydrostatic atmosphere model Weather Research and

Forecasting model (WRF), as well as computation of currents, sea level, temperature, salinity and sea ice with the model of marine circulation INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model), and the computation of wind wave parameters using the Russian wind-wave model (RWWM). The results on verification of the hydrometeorological characteristics simulated with MARS are presented. Also, the retrospective simulation of the thermohydrodynamic characteristics for the Caspian Sea was performed with MARS for the ice-free period 2003–2013. The important features of the Caspian Sea circulation are shown. The wind currents contribute the most significantly to the Caspian Sea circulation. The upwelling effect in the eastern part of Middle Caspian is caused by regional northerly winds. It should be noted that where the outputs of different models for North and Middle Caspian are in good agreement, there is significant difference in the estimates of the currents in South Caspian. The wind fields computed in MARS using the non-hydrostatic model WRF and those obtained by the formulas of geostrophic wind inferred from the pressure field from the same model are in good agreement in Middle and North Caspian. However, they differ significantly for South Caspian. This is especially noticeable at the eastern and southern coasts, where the wind computed in WRF is directed transversely to the isobars. It is shown that the wind field and the current field are interconnected. For the Caspian Sea, one should use non-hydrostatic atmospheric models such as WRF or COSMO for wind computation.

Key words: Caspian Sea; ocean circulation; operational modeling; numerical methods; MARS.

Введение

За последние десятилетия уровень моделирования циркуляции в океанах и морях существенно вырос. Это направление продолжает интенсивно развиваться, что определяется существенно возросшими возможностями вычислительной техники. На данном этапе развития численного моделирования решается проблема не только качественного изучения физических процессов морской циркуляции, но и количественного ее описания, в том числе и в оперативном режиме. Это необходимо для практических нужд при разведке, добыче и транспортировке углеводородов на шельфе и в прибрежной области. Для реализации подобного численного моделирования требуется создание комплекса, включающего модель расчета атмосферного воздействия, модель морской термогидродинамики и модель ветрового волнения. Этот комплекс моделей должен быть объединен в единую вычислительную систему. Подобная система реализована и развивается в Государственном океанографическом институте имени Н. Н. Зубова (ГОИН).

В настоящей статье показаны результаты расчетов, полученные с помощью Системы оперативного диагноза и прогноза (СОДИП), реализованной для расчета гидрометеорологических характеристик Каспийского моря. Она включает в себя расчет атмосферного воздействия по региональной негидростатической атмосферной модели Weather Research and Forecasting model (WRF) [Skamarock, 2008], расчет течений, уровня, температуры, солёности

моря и морского льда по модели морской циркуляции INMOM (Institute Numerical Mathematics Ocean Model) [Дианский, 2013] и расчет параметров волнения по Российской атмосферно-волновой модели (PABM) [Кабатченко и др., 2001]. Разработанный комплекс гидродинамического моделирования используется не только для оперативного прогноза, но и для расчетов режимных характеристик.

Система оперативного диагноза и прогноза гидрометеорологических полей для Каспийского моря

Общая схема технологии вычислительного комплекса

Основу вычислительного комплекса расчета гидротермодинамических характеристик, включая поля течений, уровня, температуры, солёности и морского льда, составляет российская модель циркуляции океанов и морей INMOM [Дианский, 2013]. Расчет атмосферного воздействия проводится по региональной модели атмосферной циркуляции WRF [Skamarock, 2008]. Для расчета ветрового волнения в вычислительный комплекс включена волновая модель PABM [Кабатченко и др., 2001]. На рис. 1 показана общая схема СОДИП, предназначенная для комплексного моделирования морской и атмосферной циркуляции, включая расчет ветрового волнения. Достоинством системы является и то, что ее можно использовать для расчетов и в ретроспективном

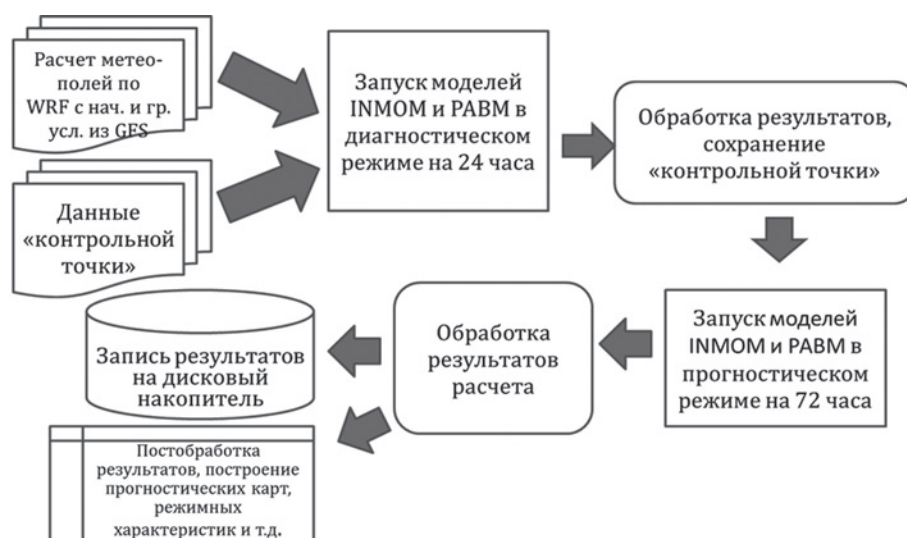


Рис. 1. Блок-схема СОДИП, реализованная для комплексного моделирования морской и атмосферной циркуляции, включая расчет ветрового волнения для акватории Каспийского моря

режиме. Для этого необходимо отключить прогностические расчеты, а в качестве входных данных использовать поля глобального реанализа за соответствующий период.

Расчет метеорологических параметров, морской циркуляции и параметров волнения происходит один раз в сутки на трое суток вперед (от 18 часов предыдущего дня) с дискретностью сохранения выходной информации 1 час для атмосферного воздействия и характеристик волнения. Для всех гидрологических полей сохранение результатов производится с шагом 6 часов.

Качество расчета морской циркуляции во многом определяется качеством расчета атмосферного воздействия. В наших расчетах для этого применяется модель WRF, которая, в силу своего высокого качества и удобства использования, принята во многих зарубежных и отечественных центрах для воспроизведения и прогноза региональной атмосферной циркуляции. Ниже приводится описание атмосферной и морской составляющих вычислительного комплекса СОДИП, без подробного рассмотрения результатов расчета волнения по модели PABM. Следует только отметить, что в PABM решается уравнение баланса спектральной плотности волнового действия в сферических координатах для частотно-углового спектра [Кабатченко и др., 2001]. При этом используется «узконаправленная» теория ветрового волнения, предложенная Захаровым и соавторами [Zakharov et al., 1999], что позволяет ускорить численное решение задачи. Этим PABM отличается, например, от наиболее используемой в мире модели ветрового волнения WAM.

Моделирование региональной циркуляции атмосферы для расчета атмосферного воздействия

В работе Зырянова [2015] было показано, что над котловинами внутри сепаратрисной изобаты в областях замкнутых изолиний ветер играет главную роль в формировании циркуляции вод, далее по порядку величин следуют бароклинность вод и испарение. Использование данных реанализа и прогноза, к примеру, центра ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts) в прогностических моделях не рекомендуется, т. к. на сайте разработчика приведено критическое замечание, что иногда результаты расчетов полей ветра нельзя признать удовлетворительными, в частности, для Средиземного и Каспийского морей [Зырянов, 2016]. Особенно это усугубляется для прибрежных акваторий [Зырянов, 2015, 2016]. Это служит основанием для критического отношения к данным реанализа полей ветра над Каспием. Поэтому в СОДИП необходимые характеристики атмосферных приводных параметров рассчитываются по негидростатической модели атмосферы WRF, которая хорошо воспроизводит склоновые потоки воздуха, вызывающие хорошо известные ветры типа черноморской Боры или однотипного с ней Бакинского норда – сильного, холодного и сухого ветра в районе г. Баку.

В качестве расчетной области для WRF, используемой для оперативного расчета и прогноза метеорологических характеристик над Каспийским регионом, в СОДИП используется пространственная сетка с шагом 15 км

в равноугольной конической проекции Ламберта. Размер сеточной области имеет 60×90 точек по долготе и широте соответственно и 27 вертикальных уровней с верхней границей на уровне 50 гПа. Входными данными для модели WRF служат поля объективного анализа и прогноза GFS (Global Forecasting System) из National Centers for Environmental Prediction. Методика расчета характеристик атмосферы по WRF заключается в интегрировании полной системы негидростатических уравнений динамики атмосферы [Skamarock, 2008] в исследуемом регионе. Граничными и начальными условиями служат данные GFS с пространственным разрешением 1° и временной дискретностью 6 часов. Подстилающая поверхность задана данными архива MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) с пространственным разрешением $30''$.

Для вычисления потоков тепла, пресной воды и импульса на поверхности моря используются следующие величины, полученные при расчете WRF и выдаваемые с шагом 1 час: температура и удельная влажность воздуха на высоте 2 м над уровнем моря; скорость ветра на высоте 10 м над уровнем моря; падающая коротковолновая и длинноволновая радиация; атмосферные осадки; давление на уровне моря. Эти параметры используются для расчета атмосферного воздействия в физически полной модели морской циркуляции INMOM (в PAVM используются только поля ветра). Турбулентные потоки тепла, пресной воды и импульса рассчитываются с использованием балк-формул [Дианский, 2013] для расчета гидротермодинамических характеристик циркуляции моря.

Численная модель циркуляции Каспийского моря

Для расчета морской циркуляции используется модель циркуляции океанов и морей INMOM [Zalesny et al., 2012; Дианский, 2013], относящаяся к классу σ -моделей. В ее основе лежит полная система так называемых примитивных уравнений гидротермодинамики моря в сферических координатах в приближениях гидростатики и Буссинеска [Дианский, 2013]. В качестве вертикальной координаты используется безразмерная величина σ , задаваемая как

$$\sigma = (z - \zeta) / (H - \zeta), \quad (1)$$

где z – обычная вертикальная координата, направленная вниз; $\zeta = \zeta(\lambda, \varphi, t)$ – отклонение уровня моря от невозмущенной поверхности как функция долготы λ , широты φ и времени t ;

$H = H(\lambda, \varphi)$ – невозмущенная глубина моря. Прогностическими переменными модели служат горизонтальные компоненты вектора скорости, потенциальная температура (T), соленость (S), отклонение уровня моря от невозмущенной поверхности, масса и сплоченность морского льда, масса снега, скорость дрейфа льда и компоненты тензора напряжений льда. Для расчета плотности используется уравнение состояния, специально предназначенное для численных моделей [Brydon et al., 1999].

Для более точного описания процессов динамики моря оператор боковой диффузии второго порядка для тепла и соли представлен в форме, эквивалентной горизонтальной диффузии в обычной z -системе координат [Дианский, 2013]. В уравнениях движения для описания боковой вязкости используется оператор 4-го порядка, эффективно подавляющий двухшаговую моду численного шума.

Пространственное разрешение модели составляет $1'8''$ и $0'49''$ по долготе и широте, что равно $\sim 1,5$ км. Сеточная область в горизонтальной плоскости содержит 393×779 узлов. По вертикали задается 20 неравномерно распределенных по глубине σ -уровней.

Параметризация крупномасштабной горизонтальной турбулентной диффузии для температуры и солености осуществляется с помощью оператора 2-го порядка с коэффициентом $50 \text{ м}^2/\text{с}$. В качестве горизонтальной вязкости применяется оператор 4-го порядка с коэффициентом $10^9 \text{ м}^2/\text{с}$.

В INMOM используется математически точная сферическая система координат, поэтому при расчете полей течений не вносятся топологических искажений, возникающих, например, при использовании декартовых систем координат, «натягиваемых» на участок сферической поверхности Земли.

Коэффициенты вертикальной вязкости и диффузии выбирались согласно параметризации [Pacanowski, Philander, 1981]. Коэффициент вертикальной вязкости изменялся от 10^{-4} до $10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$, а диффузии – от 5×10^{-6} до $5 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ для T и от 1×10^{-6} до $1 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ для S . В случае неустойчивой стратификации для параметризации конвективного перемешивания коэффициент вертикальной диффузии задавался равным $2 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. Аналогичное значение имеют коэффициенты диффузии и вязкости для более интенсивного перемешивания, чтобы избежать возможных для σ -модели ситуаций «выклинивания» вертикальных профилей T , S и скорости в приповерхностном 2,5-метровом слое моря.

Таблица 1. Координаты точек для верификации модели WRF и модели INMOM

Координаты точек для модели WRF			Координаты точек для модели INMOM		
Название	Широта	Долгота	Название	Широта	Долгота
Актау	43.860	51.092	Лагань	45.380	47.370
Атырау 1	47.117	51.917	Махачкала	42.970	47.600
Атырау 2	47.122	51.821	Саура	44.217	50.800
Аэропорт Гейдар Алиев	40.468	50.047	Тишково	45.900	48.600
Ганюшкино	46.600	49.267	Тюлений	44.467	47.483
Кочубей	44.400	46.550	Шевченко	44.650	50.230
Лагань	45.400	47.350			
Туркменбаши	40.063	53.007			

Для задания глубин использовались данные по топографии Земли GEBCO (www.gebco.net) с пространственным разрешением 30". Исходные данные высокого разрешения сглажены несколько раз с помощью фильтрации Тьюки и ограничены минимальной глубиной 2,5 м. Это необходимо при использовании σ -модели, так как в ней применяется преобразование вертикальной координаты (1), и, следовательно, функция $H = H(\lambda, \varphi)$ должна быть отличной от нуля и обладать достаточной гладкостью на выбранной пространственной сетке, поскольку входит во все операторы разностного дифференцирования [Zalesny et al., 2012; Дианский и др., 2013].

Для построения начальных условий по T и S использованы данные ФГБУ «ГОИН», предоставленные А. В. Григорьевым, представляющие собой трехмерные среднемесячные климатические поля для акватории Каспийского моря.

Для T и S на боковых границах и дне ставится условие отсутствия потоков, а для скорости – условие непротекания, дополненное условиями свободного скольжения на боковых границах и квадратичного трения на дне [Zalesny et al., 2012; Дианский и др., 2013].

Сток рек задается по данным климатического года CORE [Large, Yeager, 2009] в виде псевдоосадков, сосредоточенных в ячейках сетки, примыкающих к устьям рек.

Расчет атмосферного воздействия осуществляется по вышеописанным приводным синоптическим характеристикам атмосферы из модели WRF для вычисления потоков импульса, тепла и пресной воды для расчета гидротермодинамических характеристик циркуляции моря в модели INMOM.

Осуществляется также релаксация поверхностной солёности к климатическим данным путем введения в поток солёности на поверхности моря, рассчитываемый через поток пресной воды, релаксационной

добавки, представляющей собой разность модельной и климатической приповерхностной солёности, умноженной на коэффициент $\alpha_s = 10$ м/120 сут. Необходимость использования коррекции потока пресной воды на поверхности моря продиктована тем, что точность задания осадков и стока рек недостаточно высока. При использовании такого метода проведения экспериментов модельная солёность не сильно отклоняется от ее климатической величины, что необходимо при проведении экспериментов на длительные временные периоды.

Результаты воспроизведения гидрометеохарактеристик в акватории Каспийского моря

Для того чтобы показать работоспособность СОДИП для Каспийского моря, приведем результаты ретроспективных расчетов морской динамики и характеристик ветрового волнения за безледный период (август, сентябрь, октябрь) с 2003 по 2013 г. Верификация проводилась по данным стационарных метеостанций, расположение точек и их координаты представлены в таблице 1.

Воспроизведение динамики приводной атмосферы с помощью модели WRF

При верификации WRF использовались данные наблюдений за 2012 и 2013 гг. Для остальных лет качество воспроизведения атмосферной циркуляции приблизительно то же. В таблице 2 представлено сравнение результатов расчетов по модели WRF температуры воздуха, модуля скорости ветра, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра, давления над уровнем моря с наблюдаемыми данными. Результаты расчетов и наблюдений температуры воздуха, зональной составляющей скорости ветра и давления над уровнем моря практически совпадают ($Cr = 0,92-1,00$).

Таблица 2. Сравнение результатов расчета по модели WRF и измеренных данных

Название пункта	Температура воздуха	Модуль скорости ветра	Зональная компонента скорости ветра	Меридиональная компонента скорости ветра	Давление над уровнем моря
Актау	0.99/1.54	0.79/0.89	0.94/1.14	0.89/0.95	0.99/0.99
Атырау 1	0.99/1.59	0.82/0.75	0.92/0.95	0.87/0.95	1.00/0.65
Атырау 2	0.99/1.79	0.87/0.82	0.97/0.96	0.93/1.04	
Аэропорт Гейдар Алиев	0.95/2.58	0.78/1.47	0.59/1.50	0.92/1.66	0.99/0.92
Ганюшкино	0.99/1.93	0.80/1.03	0.92/1.23	0.77/1.27	0.99/1.21
Кочубей	0.98/1.87	0.80/0.92	0.96/0.96	0.77/1.04	0.99/0.78
Лагань	0.98/2.12	0.88/0.79	0.95/0.93	0.63/1.22	1.00/0.61
Туркменбаши	0.98/1.82	0.76/0.99	0.85/1.38	0.87/1.37	

Примечание. В числителе – коэффициент корреляции (Cr), в знаменателе – среднеквадратичная ошибка (rmse).

Таблица 3. Сравнение результатов расчета по модели INMOM и измеренных данных

	Уровень моря	Температура воды	Соленость
Лагань		0.98/0.97/0.93	
Махачкала		0.99/–1.99/0.70	0.78/–0.62/1.52
Саура	0.48/0.61/4.43		
Тишково		0.95/–2.18/0.73	
Тюлений	0.86/–9.09/8.93	0.97/–1.50/1.19	
Шевченко	0.32/–0.49/4.12		

Примечание. По порядку показаны: коэффициент корреляции, среднее отклонение и среднеквадратичное отклонение.

Сравнение модельных и измеренных величин меридиональной компоненты скорости ветра и модуля скорости ветра дают меньшую согласованность с данными наблюдений ($Cr = 0,63–0,93$, $rmse = 0,75–1,47$). Поскольку в модели WRF атмосферные параметры воспроизводятся адекватно, не будем далее останавливаться на них.

Воспроизведение морской динамики с помощью модели INMOM

Для целостного восприятия картины циркуляции вод Каспийского моря были проанализированы поля течений, солёности, температуры, ветра и др. В первую очередь покажем качество воспроизведения временного хода уровня моря, температуры и солёности воды, рассчитанных по INMOM и проинтерполированных в места положения станций. В таблице 3 представлено сравнение результатов расчетов по INMOM с данными наблюдений. Показано, что INMOM достаточно хорошо воспроизводит только временную изменчивость температуры воды.

Из сравнения моделируемых атмосферных параметров (табл. 2) и параметров уровня, температуры и солёности воды (табл. 3) с соответствующими данными наблюдений видно, что первые имеют с ними большую

согласованность. Сравнение модельных и измеренных величин вообще является фундаментальной проблемой современной океанографии. С одной стороны, измерения производятся в точках станций наблюдений, а модельные расчеты дают значения, осредненные в пределах ячейки расчетной сетки численной схемы. В нашем случае это $1,5 \times 1,5$ км. Следовательно, ожидать точного соответствия между модельными и наблюдаемыми значениями невозможно. С другой стороны, при обработке данных наблюдений за уровнем моря для исключения волновой составляющей используется простое скользящее среднее, которое также определяется с ошибкой. Поэтому волновая составляющая дает остаточные проявления волн в уровне моря. По этой же причине в данные наблюдений могут «просачиваться» и турбулентные пульсации разных масштабов. Это может приводить к недостаточной согласованности данных измерений с результатами моделирования, поскольку волновая составляющая и турбулентность в моделях морской циркуляции учитываются опосредованно путем эмпирических параметризаций. В силу того, что в атмосфере радиус деформации Россби в несколько десятков раз больше, чем в море, отмеченные проблемы для атмосферы менее существенны. Поэтому в настоящее время сравнение моделируемой

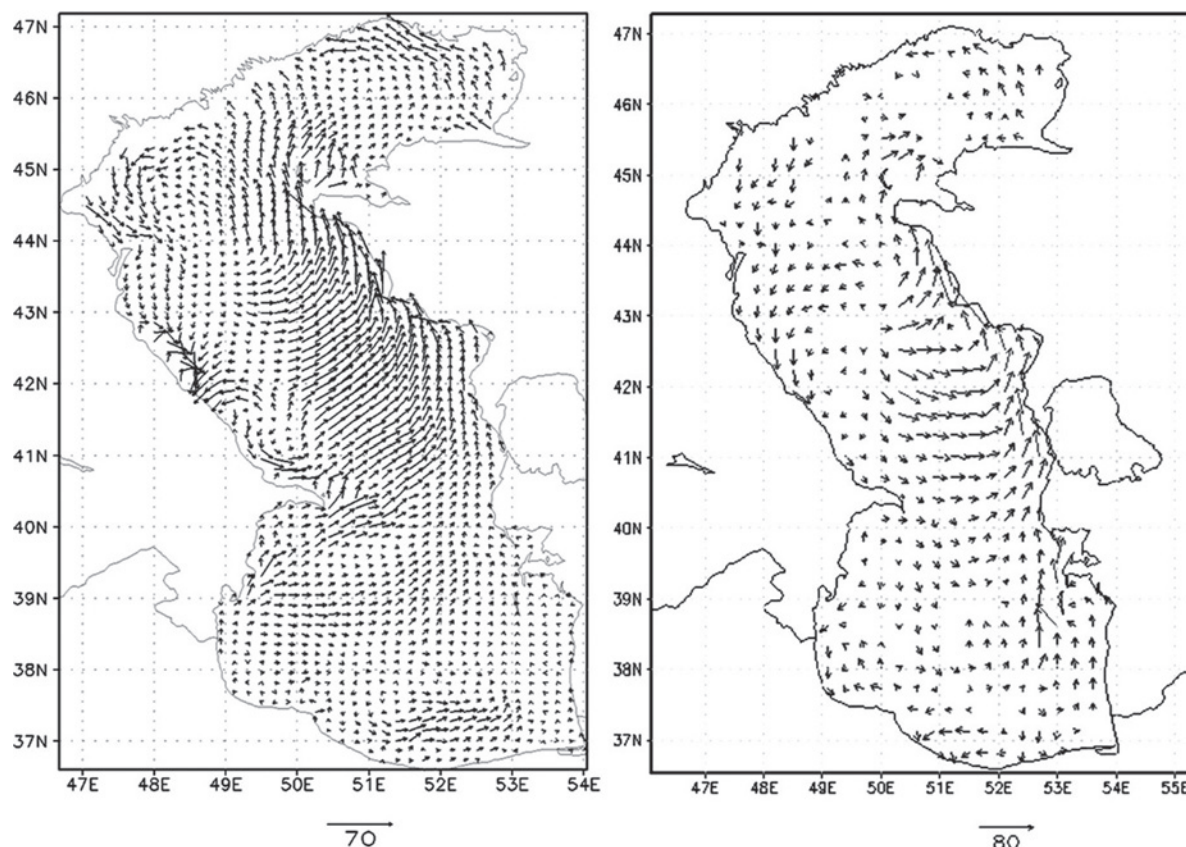


Рис. 2. Приповерхностные скорости течений по результатам расчета по модели INMOM (слева) и по ЕСИМО (справа) для 06.00UTC 09.10.2012 г.

и наблюдаемой атмосферной гидродинамики по качеству выше, чем морской. Следует учесть еще и ошибки при расчете атмосферного воздействия на морской поверхности, неизбежно возникающие даже при применении общепринятых современных балк-формул, что приводит и к ошибкам при расчете морской циркуляции, поскольку эти формулы являются эмпирическими и не могут отражать все особенности реального турбулентного взаимодействия атмосферы и океана с учетом ветрового волнения. В атмосфере всегда присутствуют так называемые внутренние волны, которые вызывают возмущения в поле давления на уровне моря в 1–3 гПа и в поле приповерхностного ветра. В свою очередь, это должно формировать возмущения уровня моря приблизительно в 2–5 см и, соответственно, в поле приповерхностных скоростей течений. При этом пространственно-временные масштабы возмущений достаточно малы. Поэтому для воспроизведения данного физического эффекта необходимо использовать атмосферную модель с таким же высоким пространственно-временным разрешением, как и модель морской циркуляции. Однако при современном уровне вычислительных возможностей этого пока сделать нельзя.

Ранее в [Ибраев, 2008] было показано, что в таком сравнительно небольшом и мелководном бассейне, как Каспийское море, течения определяются прежде всего прямым воздействием ветра. Характерная черта сезонной изменчивости ветра в Среднем и Южном Каспии – это изменение направления с восточного на северный от зимы к лету и переход с преимущественно циклонической завихренности на антициклоническую от осенне-зимнего к весенне-летнему периоду [Ибраев, Курдюмов, 2003; Кныш и др., 2008]. Таким образом, поверхностные течения над глубоководными районами Среднего и Южного Каспия меняют направление с северо-западного зимой на юго-западное летом в соответствии с преимущественно восточными ветрами зимой и северными – летом. У восточного берега Среднего и Южного Каспия на поверхности с апреля по сентябрь течение направлено на юг, а в конце года формируется апвеллинг [Ibrayev et al., 2001, 2010]. Эту особенность наглядно иллюстрируют оперативные приповерхностные характеристики для Каспийского моря, полученные в реальном времени. На рис. 2 и 3 показаны примеры полей скорости поверхностных течений по результатам

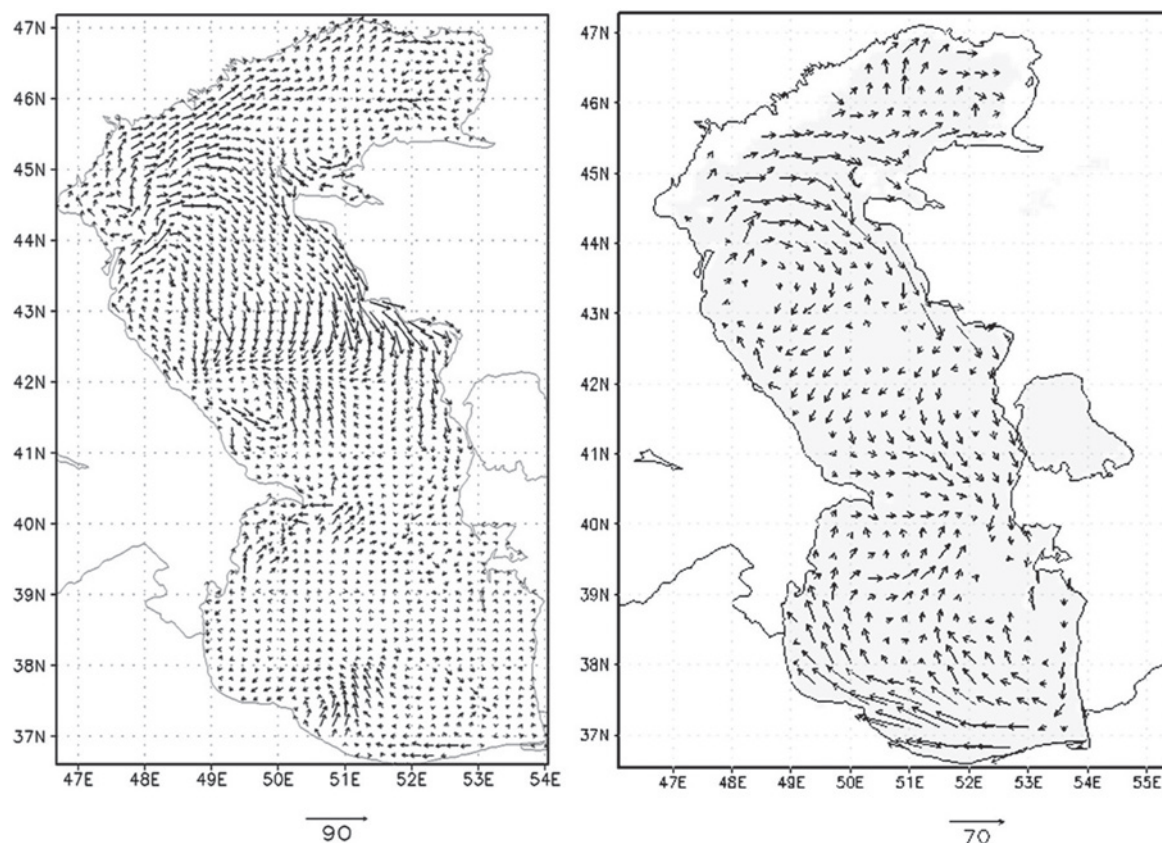


Рис. 3. Приповерхностные скорости течений по результатам расчета по модели INMOM (слева) и по ЕСИМО (справа) для 06.00UTC 15.01.2013 г.

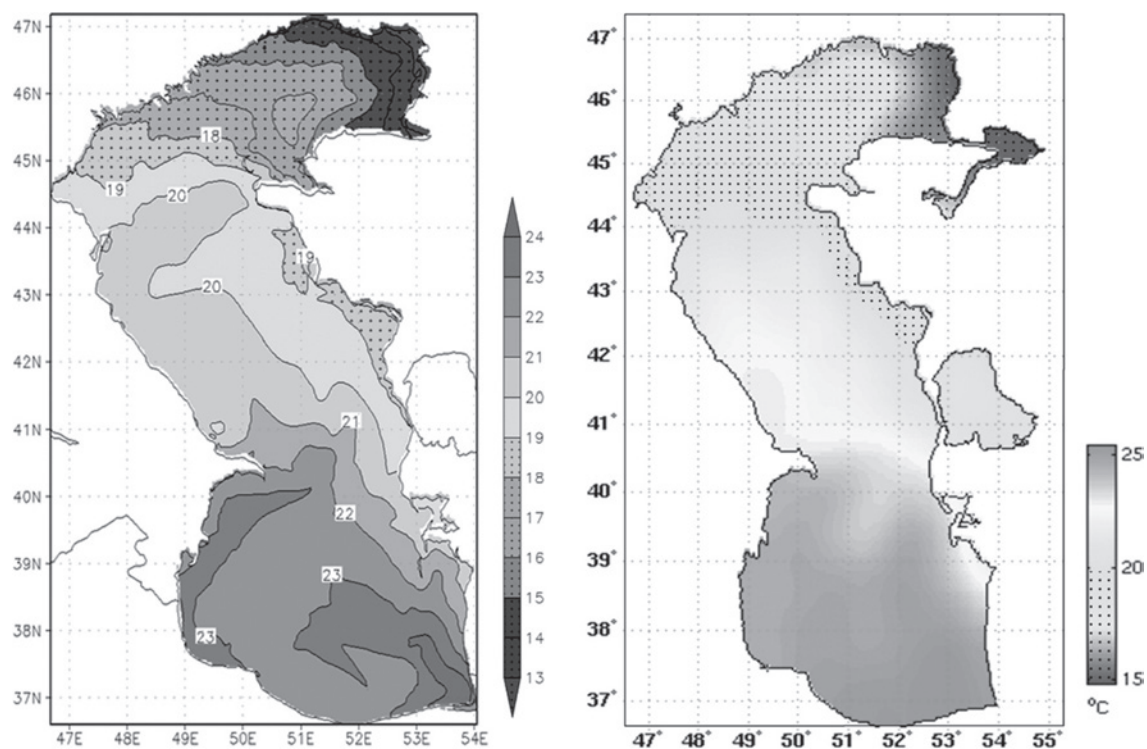


Рис. 4. Температура воды по результатам расчета по модели INMOM (слева) и по данным Гидрометцентра (справа) для 06.00UTC 09.10.2012 г.

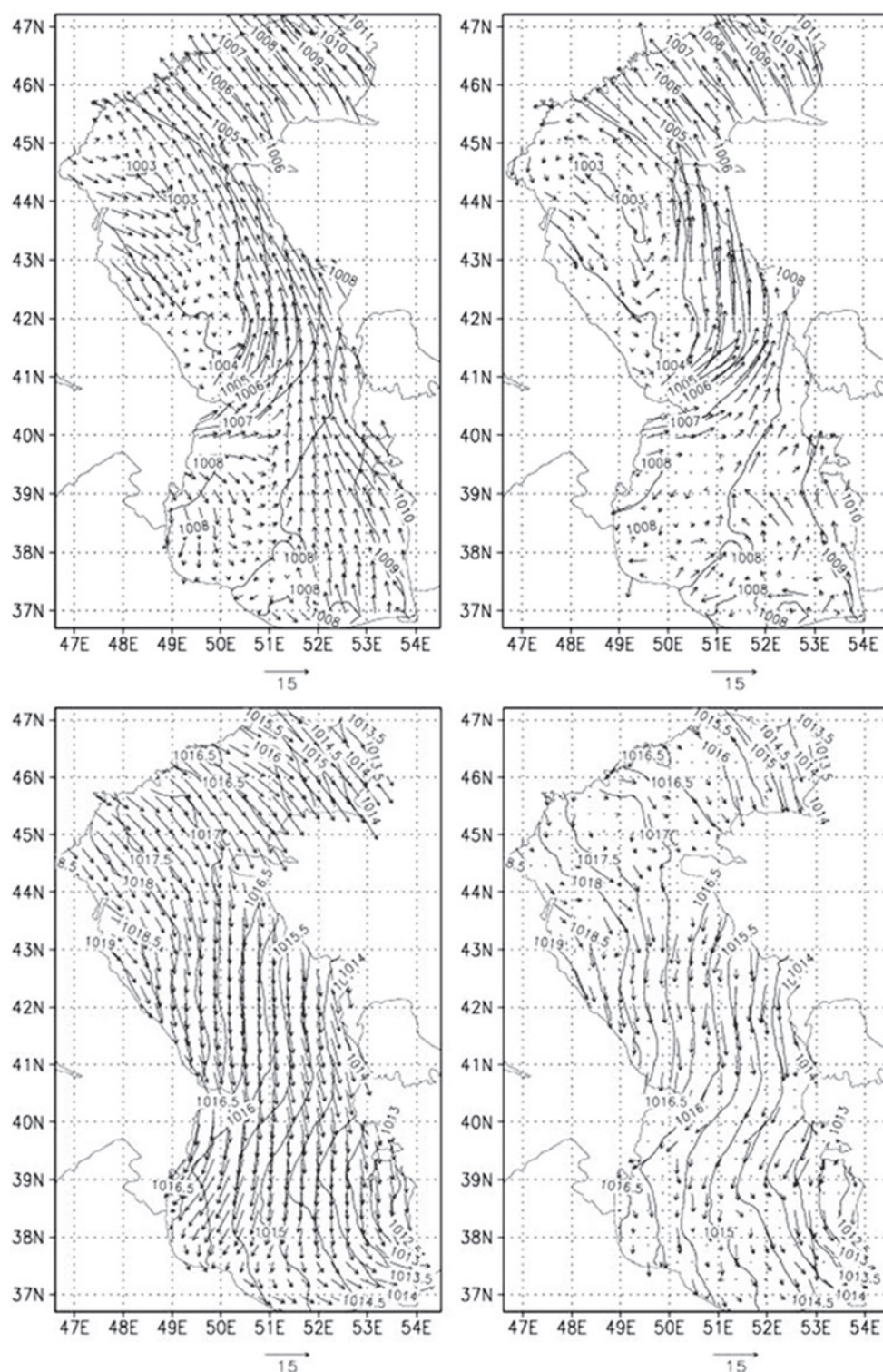


Рис. 5. Приповерхностное поле ветра по результатам расчета WRF (слева) и рассчитанное по формулам геострофического ветра по полю давления из той же модели WRF за срок 06.00UTC 09.10.2012 г. (сверху) и 06.00UTC 10.10.2012 г. (внизу). Масштаб стрелок в см/с показан внизу

моделирования для 06.00UTC 09.10.2012 г. и 06.00UTC 15.01.2013 г. (рис. 2 и 3 слева) в стандартной выдаче расчета СОДИП для Каспийского моря и из открытой базы данных ЕСИМО, рассчитанных по модели Гидрометцентра [Попов, Лобов, 2013]. Сравнение карт

течений по модели INMOM с картами ветровой циркуляции по результатам расчета Гидрометцентра на рис. 3 позволяет констатировать их хорошую согласованность и показывает, что основной вклад в циркуляцию вносят ветровые течения.

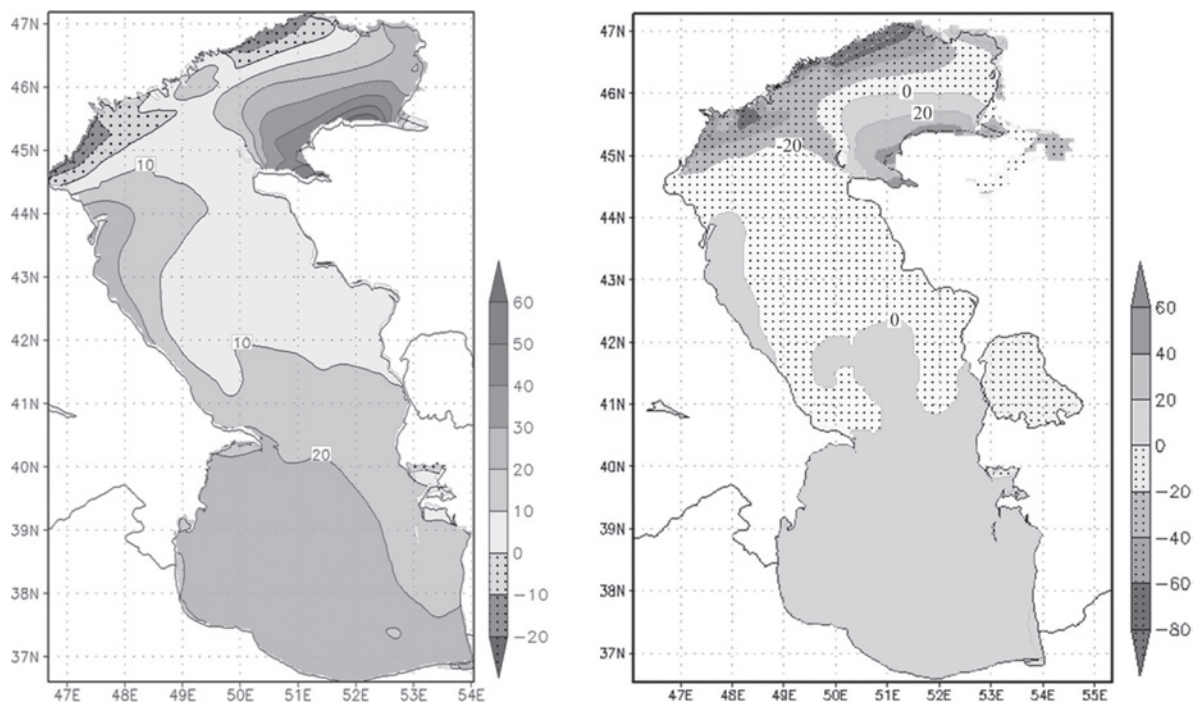


Рис. 6. Уровень моря по результатам расчета по модели INMOM и по данным Гидрометцентра для 06.00UTC 09.10.2012 г.

В октябре 2012 года в средней части Каспийского моря формировался обширный циклонический круговорот. С восточной стороны он образуется северным струйным течением, расположенным над склоном шельфа и простирающимся от центральной части Южного до Северного Каспия, и сопровождается вытянутым в северном направлении языком относительно теплой воды вдоль восточного берега моря (рис. 4). В Северном Каспии оно разворачивается к югу и следует к Апшеронскому полуострову в виде прибрежного течения. Севернее Апшеронского полуострова располагается циклонический вихрь, береговой сегмент которого составляет юго-западную периферию циклонического круговорота Северного Каспия. В Южном Каспии действует циклонический вихрь в северо-западной части и антициклонический – в центральной и южной глубоководных частях.

Система поверхностных течений моря изменчива, и отклик на изменение ветра может иметь всего несколько суток. Так, в январе 2013 г. направление ветра над морем привело к перестройке течений всего моря. В северной части Среднего Каспия сформировался антициклон. В центральной части течения южного направления сталкивались с северным течением, образуя слабое поверхностное течение вдоль западного берега и антициклонический вихрь севернее Апшеронского полуострова (рис. 3).

Обращает на себя внимание следующий факт. Если в Северном и Среднем Каспии течения, рассчитанные по разным моделям, имеют хорошее согласие, то в Южном Каспии наблюдается их существенное различие. По-видимому, это различие определяется ветровым воздействием. В СОДИП оно рассчитывается с помощью негидростатической модели WRF относительно высокого пространственного разрешения. В этом случае учитываются негидростатические эффекты, связанные с гористым рельефом, особенно важным для формирования ветрового поля в Южном Каспии. В модели Гидрометцентра для задания ветрового воздействия используется региональная гидростатическая модель Лосева [2010]. В этом случае приповерхностный ветер более сильно связан с приповерхностным давлением через геострофическое соотношение. На рис. 5 показаны приповерхностные поля ветра на 06.00UTC 09.10.2012 г. и 06.00UTC 10.10.2012 г., т. е. ровно через сутки, рассчитанные в модели WRF и по формулам геострофического ветра по полю давления из этой же модели. Из рисунка видно, что поля ветра, рассчитанные разным способом, хорошо согласованы в Среднем и Северном Каспии. Однако в Южном Каспии они существенно отличаются, что проявляется 06.00UTC 09.10.2012 г. Особенно это проявляется у восточного и южного берегов, когда ветер, рассчитанный в модели WRF, направлен поперек изобар.

Следует отметить резкую перестройку ветра, произошедшую за сутки. Сравнение карт ветра из рис. 5 с картами течений на рис. 2 показывает, что соответствующие поля течений и ветра связаны. Таким образом, можно сделать вывод о том, что для Южного Каспия необходимо использовать для расчета ветра негидростатические модели атмосферы типа WRF или COSMO.

На рис. 6 показаны поля уровня моря для безледного периода на 06.00UTC 09.10.2012 г. по результатам моделирования. Большой интерес вызывает водообмен между Средним и Южным Каспием. Из этого рисунка видно, что вдоль восточного берега происходит вытекание вод из Среднего Каспия в Южный, а у противоположного берега, наоборот, проявляется втекание. Вытекание вод формируется северным течением. Это происходит не только в приповерхностном слое, но и в целом по глубине, о чем свидетельствует распределение уровня моря. При этом изменение уровня в Южном Каспии с повышением с востока на запад точно соответствует северному ветру за соответствующий срок, показанному на рис. 5.

Таким образом, модель INMOM вполне успешно воспроизводит динамику поверхностных циркуляционных течений в рамках работы системы СОДИП.

Выводы

Для акватории Каспийского моря разработан комплекс гидродинамических моделей, объединенных в единый расчетный комплекс, – система оперативного диагноза и прогноза (СОДИП). Она включает в себя расчет атмосферного воздействия по региональной негидростатической атмосферной модели WRF, расчет течений, уровня, температуры, солёности моря и морского льда по модели морской циркуляции INMOM и расчет параметров волнения по RABM.

Проведена верификация всех рассчитываемых с помощью СОДИП гидрометеохарактеристик для Каспийского моря по данным наблюдений на стационарных станциях. Сравнения ветра, температуры воды, солёности, течений и уровня моря показали высокую степень адекватности модельных расчетов и наблюдений. Это говорит о применимости СОДИП как для оперативных, так и для ретроспективных расчетов с целью определения режимов гидрометеорологических характеристик.

Воспроизведена структура циркуляции Каспийского моря за отдельные периоды с 2012 по 2013 г. Основу циркуляции Каспийского

моря составляют северное и южное течения, которые хорошо воспроизводятся моделью INMOM. Показано, что основной вклад в циркуляцию Каспийского моря делают ветровые течения. В частности, апвеллинг в восточной части Среднего Каспия обусловлен региональными ветрами северного направления, а ветровая природа северного течения вдоль восточного склона шельфа отражается в том, что температура воды играет роль трасера этого течения.

Показано, что вдоль восточного берега происходит вытекание вод из Среднего Каспия в Южный, а у противоположного берега, наоборот, проявляется втекание. Вытекание формируется северным течением. Это происходит не только в приповерхностном слое, но и в целом по глубине, о чем свидетельствует распределение уровня моря.

Установлено, что только в Южном Каспии наблюдается существенное различие течений, рассчитанных по разным моделям. Вероятно, это обусловлено ветровым воздействием. Ветровые поля, рассчитанные в СОДИП с помощью негидростатической модели WRF и полученные по формулам геострофического ветра по полю давления из этой же модели, также хорошо согласованы в Среднем и Северном Каспии, но в Южном Каспии они существенно отличаются. Особенно это заметно у восточного и южного берегов, когда ветер, рассчитанный в WRF, направлен поперек изобар. Показано, что поля ветра и течений связаны. Следовательно, можно сделать вывод о том, что для Каспийского моря необходимо использовать для расчета ветра негидростатические модели атмосферы типа WRF или COSMO. Особенно это актуально для Южного Каспия.

Авторы выражают признательность А. В. Григорьеву за предоставленные данные, а также С. К. Попову за полезные консультации при подготовке статьи.

Работа выполнена в Институте водных проблем Севера КарНЦ РАН при финансовой поддержке РНФ (грант № 14–17–00740).

Литература

Дианский Н. А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М.: Физматлит, 2013. 272 с.

Дианский Н. А., Фомин В. В., Жохова Н. В., Коршенко А. Н. Расчет течений и распространения загрязнений в прибрежных водах Большого Сочи // Известия РАН, ФАО. 2013. Т. 49, № 6. С. 664–675.

Ибраев Р. А. Математическое моделирование термогидродинамических процессов в Каспийском море. М.: ГЕОС, 2008. 128 с.

Ибраев Р. А., Курдюмов Д. Г. Чувствительность сезонной изменчивости циркуляции вод Каспийского моря к параметризации вертикального перемешивания в модели гидродинамики // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39, № 6. С. 849–856.

Кабатченко И. М., Матушевский Г. В., Резников М. В., Заславский М. М. Моделирование ветра и волн при вторичных термических циклонах на Черном море // Метеорология и гидрология. 2001. № 5. С. 61–71.

Кныш В. В., Ибраев Р. А., Коротаев Г. К., Инюшина Н. В. Сезонная изменчивость климатических течений Каспийского моря, восстановленных ассимиляцией климатической температуры и солености в модели циркуляции вод // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44, № 2. С. 251–265.

Лосев В. М. Региональная гидродинамическая модель Гидрометцентра России // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада ЛТД, 2010. С. 36–58.

Попов С. К., Лобов А. Л. Моделирование пространственно-временной изменчивости уровня Каспийского моря в 1948–1994 гг. // Труды Гидрометцентра России. 2013. Вып. 350. С. 68–87.

Зырянов В. Н. Гидродинамические основы формирования крупномасштабной циркуляции вод Каспийского моря. 1. Асимптотическая теория // Водные ресурсы. 2015. Т. 42, № 6. С. 600–612.

Зырянов В. Н. Гидродинамические основы формирования крупномасштабной циркуляции вод Кас-

пийского моря. 2. Численные расчеты // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 2. С. 1–15

Brydon D., San S., Bleck R. A new approximation of the equation of state for seawater, suitable for numerical ocean models // J. Geoph. Res. 1999. Vol. 104, no. C1. P. 1537–1540.

Ibrayev R. A., Sarkisyan A. S., Trukhchev D. I. Seasonal variability of circulation in the Caspian Sea reconstructed from normal hydrological data // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2001. Т. 37, no. 1. С. 96–98.

Ibrayev R. A., Özsoy E., Schrum C., Sur H. I. Seasonal variability of the Caspian Sea three-dimensional circulation, sea level and air-sea INTERACTION // Ocean Science. 2010. Т. 6, no. 1. С. 311–329.

Large W. G., Yeager S. G. The global climatology of an interannually varying air – sea flux // Climate Dynamics. 2009. Vol. 33. P. 341–364.

Pacanowski R. C., Philander S. G. H. Parametrization of vertical mixing in numerical models of the tropical ocean // J. Phys. Oceanogr. 1981. Vol. 11. P. 1443–1451.

Skamarock A. Description of the Advanced Research WRF, Version 3 – NCAR Technical Notes, 2008.

Zakharov V. E., Zaslavskii M. M., Kabatchenko I. M. et al. Conceptually new wind-wave model. In: The wind-driven air-sea interface electromagnetic and acoustic sensing, wave dynamics and turbulent fluxes, Sydney, Australia, 1999. P. 159–164.

Zalesny V. B., Diansky N. A., Fomin V. V. et al. Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2012. Vol. 27, no. 1. P. 95–111.

Поступила в редакцию 12.02.2016

References

Dianskij N. A. Modelirovanie cirkuljaccii okeana i issledovanie ego reakcii na korotkoperiodnye i dolgo-periodnye atmosferynye vozdejstvija [Ocean circulation modelling and investigation of its response to short- and long-period atmospheric forcing]. Moscow: PhysMath-Lit, 2013. 272 p.

Diansky N. A., Fomin V. V., Zhokhova N. V., Korshenko A. N. Raschet techenii i rasprostraneniya zagryazneniya v pribrezhnykh vodakh Bol'shogo Sochi [Simulations of currents and pollution transport in the coastal waters of Big Sochi]. Izvestiya RAN, FAO [Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics]. 2013. Vol. 49, no. 6. P. 611–621.

Ibraev R. A. Matematicheskoe modelirovanie termogidrodinamicheskikh processov v Kaspijskom more [Mathematical modelling of thermohydrodynamic processes in the Caspian Sea]. Moscow: GEOS, 2008. 128 p.

Ibraev R. A., Kurdjumov D. G. Chuvstvitel'nost' sezonnoi izmenchivosti tsirkulyatsii vod Kaspijskogo morya k parametrizatsii vertikal'nogo peremeshivaniya v modeli gidrodinamiki [Sensitivity of seasonal variability of the Caspian Sea circulation to the parametrization of vertical mixing in a hydrodynamic model]. Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana [Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics]. 2003. Vol. 39, no. 6. P. 768–774.

Kabatchenko I. M., Matushevskii G. V., Reznikov M. V., Zaslavskii M. M. Modelirovanie vetra i voln pri vtorichnykh termicheskikh tsiklonakh na Chernom more [Numerical modelling of wind and waves in a secondary cyclone at the Black Sea]. Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and hydrology]. 2001. No. 5. P. 45–53.

Knysh V. V., Korotaev G. K., Inyushina N. V., Ibrayev R. A. Sezonnaya izmenchivost' klimaticheskikh techenii Kaspijskogo morya, vosstanovlennyykh assimilyatsiei klimaticheskoi temperatury i solenosti v modeli tsirkulyatsii vod [Seasonal variability of climatic currents in the Caspian Sea reconstructed by assimilation of climatic temperature and salinity into the model of water circulation]. Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana [Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics]. 2008. Vol. 44, no. 2. P. 236–249.

Losev V. M. Regional'naja gidrodinamicheskaja model' Gidrometcentra Rossii [Regional hydrodynamic model of the Hydrometeorological Center of Russia]. 80 let Gidrometcentru Rossii [The 80th anniversary of the Hydrometeorological Center of Russia]. Moscow: Triada LTD, 2010. P. 36–58.

Popov S. K., Lobov A. L. Modelirovanie prostranstvenno-vremennoj izmenchivosti urovnja Kaspijskogo morya v 1948–1994 gg. [Modelling of spatial and

temporal variability of the Caspian Sea level in 1948–1994]. *Trudy Gidrometcentra Rossii [Proceedings of the Hydrometeorological Center of Russia]*. 2013. No. 350. P. 68–87.

Zyryanov V. N. *Gidrodinamicheskie osnovy formirovaniya krupnomasshtabnoi tsirkulyatsii vod Kaspiiskogo morya*. 1. Asimptoticheskaya teoriya [Hydrodynamic basis of formation of large-scale water circulation in the Caspian Sea: 1. Asymptotic theory]. *Vodnye resursy [Water Resources]*. 2015. Vol. 42, no. 6. P. 294–304.

Zyryanov V. N. *Gidrodinamicheskie osnovy formirovaniya krupnomasshtabnoi tsirkulyatsii vod Kaspiiskogo morya*. 2. Chislennyye raschety [Hydrodynamic basis of formation of large-scale water circulation in the Caspian Sea: 2. Numerical simulation]. *Vodnye resursy [Water Resources]*. 2016. Vol. 43, no. 2. P. 1–15

Brydon D., San S., Bleck R. A new approximation of the equation of state for seawater, suitable for numerical ocean models. *J. Geoph. Res.* 1999. Vol. 104, no. C1. P. 1537–1540.

Ibrayev R. A., Sarkisyan A. S., Trukhchev D. I. Seasonal variability of circulation in the Caspian Sea reconstructed from normal hydrological data. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2001. Vol. 37, no. 1. C. 96–98.

Ibrayev R. A., Özsoy E., Schrum C., Sur H. I. Seasonal variability of the Caspian Sea three-dimensional circulation, sea level and air-sea INTERACTION. *Ocean Science*. 2010. Vol. 6, no. 1. P. 311–329.

Large W. G., Yeager S. G. The global climatology of an interannually varying air – sea flux. *Climate Dynamics*. 2009. Vol. 33. P. 341–364.

Pacanowski R. C., Philander S. G. H. Parametrization of vertical mixing in numerical models of the tropical ocean. *J. Phys. Oceanogr.* 1981. Vol. 11. P. 1443–1451.

Skamarock A. Description of the Advanced Research WRF, Version 3 – NCAR Technical Notes, 2008.

Zakharov V. E., Zaslavskii M. M., Kabatchenko I. M., Matushevskii G. V., Polnikov V. G. Conceptually new wind-wave model. In: *The wind-driven air-sea interface electromagnetic and acoustic sensing, wave dynamics and turbulent fluxes*, Sydney, Australia, 1999. P. 159–164.

Zalesny V. B., Diansky N. A., Fomin V. V., Moshonkin S. N., Demyshev S. G. Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov. *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modeling*. 2012. Vol. 27, no. 1. P. 95–111.

Received February 12, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Дианский Николай Ардадьевич

ведущий научный сотрудник, доцент, д. ф.-м. н.
Государственный океанографический институт
им. Н. Н. Зубова
Кропоткинский пер., 6, Москва, Россия, 119034

Институт вычислительной математики РАН
ул. Губкина, 8, Москва, Россия, 119333

Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: nikolay.diansky@gmail.com
тел.: +79268206665

Фомин Владимир Васильевич

научный сотрудник
Государственный океанографический институт
им. Н. Н. Зубова
Кропоткинский пер., 6, Москва, Россия, 119034

Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: lihar_89@mail.ru
тел.: +79057979412

Выручалкина Татьяна Юрьевна

научный сотрудник, к. г. н.
Институт водных проблем РАН
ул. Губкина, 3, Москва, Россия, 119333

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

CONTRIBUTORS:

Diansky, Nikolai

N. N. Zubov State Oceanographic Institute
6 Kropotkinskii per., 119034 Moscow, Russia

Institute of Numerical Mathematics,
Russian Academy of Sciences
8 Gubkin St., 119333 Moscow, Russia

Northern Water Problems Institute,
Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: nikolay.diansky@gmail.com
tel.: +7926 8206665

Fomin, Vladimir

N. N. Zubov State Oceanographic Institute
6 Kropotkinskii per., 119034 Moscow, Russia

Northern Water Problems Institute,
Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: lihar_89@mail.ru
tel.: +79057979412

Vyruchalkina, Tatiana

Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences
3 Gubkin St., 119333 Moscow, Russia

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

эл. почта: vyruchi@list.ru
тел.: +74991355374

Гусев Анатолий Владимирович

научный сотрудник, к. ф.-м. н.
Институт вычислительной математики РАН
ул. Губкина, 8, Москва, Россия, 119333

Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: anatoly.v.gusev@gmail.com
tel.: +79032467187

e-mail: vyruchi@list.ru
tel.: +74991355374

Gusev, Anatoly

Institute of Numerical Mathematics,
Russian Academy of Sciences
8 Gubkin St., 119333 Moscow, Russia

Northern Water Problems Institute,
Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: anatoly.v.gusev@gmail.com
tel.: +79032467187

ГИДРОХИМИЯ ВОД И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

УДК 556.114.6.:556.555.8 (282.242.211)

БИОГЕННАЯ НАГРУЗКА НА ОНЕЖСКОЕ ОЗЕРО ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

П. А. Лозовик¹, Г. С. Бородулина¹, Ю. В. Карпечко¹,
С. А. Кондратьев², А. В. Литвиненко¹, И. А. Литвинова¹

¹ Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

² Институт озераведения РАН

На основании данных по химическому составу и объему воды источников формирования гидрохимического режима Онежского озера, а также сведений по количеству выращенной товарной форели в его бассейне приведена оценка биогенной фосфорной и азотной нагрузок на озеро, включая их отдельные составляющие от различных источников. Установлены природная и антропогенная нагрузки на озеро и выполнено сопоставление последней с ассимиляционной способностью водоема. Расчеты биогенной нагрузки по натурным данным согласуются с результатами математического моделирования с использованием модели ILLM Института озераведения РАН.

К л ю ч е в ы е с л о в а: Онежское озеро; биогенная нагрузка; речные воды; подземные воды; селитебные территории; свалки бытовых отходов; лесо- и сельскохозяйственные объекты; рыбоводческие хозяйства; ассимиляционная способность.

P. A. Lozovik, G. S. Borodulina, Yu. V. Karpechko, S. A. Kondratyev, A. V. Litvinenko, I. A. Litvinova. NUTRIENT LOAD ON LAKE ONEGO ACCORDING TO FIELD DATA

The phosphorus and nitrogen loads on Lake Onego, including individual components of the nutrients from different sources, were estimated from the data on the chemical composition and the water volume of the sources that form the hydrochemical regime of Lake Onego, and from the data on the volumes of commercial trout farming in the lake catchment. Natural and anthropogenic load on the lake was determined, and the latter was compared to the lake's assimilative capacity. Nutrient load estimates based on observed data are in good agreement with the results of mathematical modeling carried out at the Institute of Limnology RAS by means of the ILLM model.

Key words: Lake Onego; nutrient load; river water; groundwater; residential areas; municipal landfills; forestry and agricultural sites; fish farms; assimilative capacity.

Введение

Онежское озеро является вторым по величине крупнейшим пресноводным водоемом Европы. Оно испытывает антропогенное влияние вследствие поступления сточных вод, сельскохозяйственной и лесохозяйственной деятельности на его водосборе, развития форелеводства и выноса веществ со свалок и селитебных территорий. В настоящее время по содержанию общего фосфора озеро достигло верхней границы для олиготрофных водоемов, тогда как концентрации форм азота в нем остаются неизменными за многолетний период наблюдений [Сабылина, 2007]. Целью работы было установить нагрузку на озеро от различных источников поступления биогенных веществ. Количественная оценка биогенной нагрузки на озеро имеет большое практическое значение для разработки мероприятий по ее снижению и предотвращению эвтрофирования водоема.

Объекты и методы исследования

Оценка биогенной нагрузки на озеро проводилась с учетом непосредственно речного притока в озеро и подземного стока с межустьевых участков, атмосферных осадков, сточных вод, сбрасываемых в озеро, стока с селитебных территорий, находящихся на побережье озера, рыбоводческих хозяйств на акватории озера (рис. 1). Для решения этой задачи были собраны данные по объему и химическому составу вод, поступавших в озеро различными путями. Отдельно рассматривалось поступление веществ от антропогенных источников, расположенных на водосборе озера.

Для оценки антропогенной составляющей в речном химическом стоке были определены фоновые концентрации биогенных элементов (БЭ). Это в конечном итоге позволило

определить нагрузку от сельскохозяйственных и лесохозяйственных объектов.

Использовались данные по химическому составу воды притоков озера, полученные в 2007–2008 гг. по гидрологическим сезонам года, сведения о составе сточных вод 15 водовыпусков, химическом составе атмосферных осадков незагрязненных районов бассейна озера, а также данные по составу дренажных и ливневых вод с территории г. Петрозаводска и городской свалки бытовых отходов. Форелевые хозяйства были учтены по выносу БЭ с 1 т товарной продукции.

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

Результаты и обсуждение

Водный баланс Онежского озера

В приходной части водного баланса озера основной составляющей является речной приток с водосбора (рис. 2). В среднем он составляет $17,3 \text{ км}^3$ (73 %). В маловодные годы его доля уменьшается до 65 % (1960 г.), в многоводные (1962 г.) увеличивается до 81 % общего прихода. Подземный приток с межустьевых территорий, оцененный в объеме $0,14 \text{ км}^3$, составляет менее 1 % от речного притока.



Рис. 1. Составляющие биогенной нагрузки на Онежское озеро

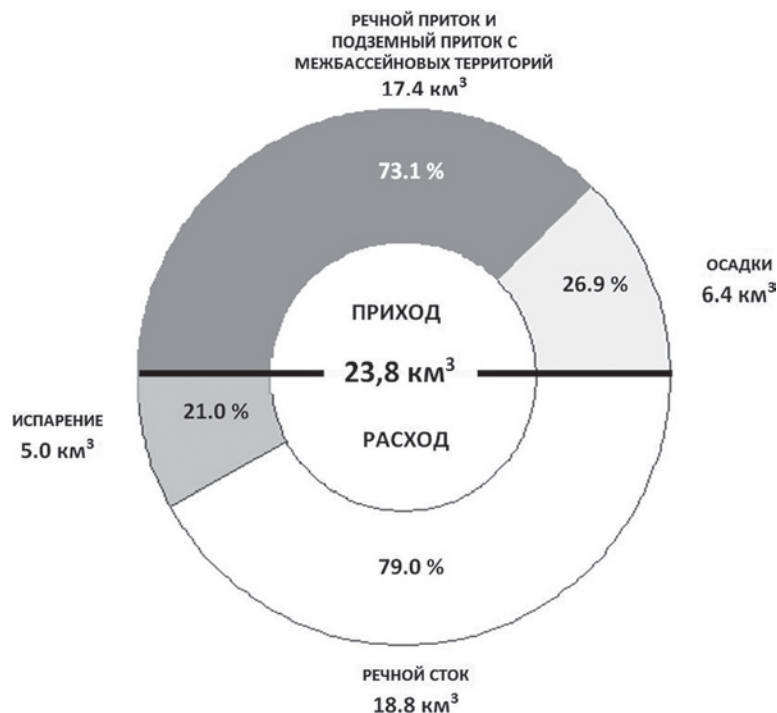


Рис. 2. Структура многолетнего водного баланса Онежского озера

Доля атмосферных осадков в приходной части баланса изменяется от 19 до 34 %. Количество осадков получено по данным наблюдений пяти прибрежных метеостанций: Петрозаводск, Кондопога, Медвежьегорск, Пудож и Вытегра. Сток по р. Свири составляет 84 % расходной части водного баланса за многолетний период. В 1962 г. его доля составляла 91 % общего расхода, в 1960 г. – около 76 %. Испарение с акватории озера было рассчитано Ю. А. Сало по уравнению водного баланса [Онежское озеро..., 2010]. На долю испарения с водной поверхности озера приходится от 9 % (1962 г.) до 24 % (1960 г.) общего расхода воды. Период условного водообмена озера по стоку составляет 15,7 года.

Биогенный речной сток в озеро

Для расчета биогенной речной нагрузки на озеро вначале выполнялся расчет средневзвешенной по объему концентрации БЭ в каждом притоке с учетом сезонного распределения его стока. Затем рассчитывалась средневзвешенная по объему концентрация БЭ во всех притоках. Для этого использованы среднегодовое распределение стока по всем обследованным притокам и среднегодовые концентрации БЭ (табл. 1).

Так как среднегодовой сток обследованных притоков составил 14,93 км³, или 86 % от общего речного стока в озеро, то рассчитанные

средневзвешенные концентрации БЭ приняты и для необследованных притоков.

Проведенные расчеты показали, что поступление $P_{\text{общ}}$ с речным стоком в озеро составляет 656 т/год, из которого 24 % приходится на $P_{\text{мин}}$. Сток общего азота значительно больше – 10172 т/год. Превалирует $N_{\text{орг}}$ (8079 т, 79 %), на долю NH_4^+ (900 т) и NO_3^- (1159 т) приходится по 10 %. В распределении речного стока БЭ нет ничего удивительного: фактически он отражает содержание БЭ в поверхностных водах Карелии, в которых, за исключением больших стратифицированных озер, преобладает $N_{\text{орг}}$, а содержание $P_{\text{мин}}$ составляет 10–20 % от $P_{\text{общ}}$ [Лозовик, 2006].

Поступление биогенных элементов в озеро с атмосферными осадками

Атмосферные осадки играют важную роль в балансе биогенных элементов озер с большой водной поверхностью. Объем осадков, выпадающих на поверхность Онежского озера, площадь зеркала которого составляет 9840 км², достигает 6,4 км³/год. Для характеристики химических выпадений с атмосферными осадками на акваторию озера использовались данные, обобщенные в монографии [Состояние..., 2007], а также материалы последних лет наблюдений (2008–2014 гг.) (табл. 2). Следует отметить, что существенной разницы в составе осадков разных лет не наблюдается.

Таблица 1. Среднегодовой сток и среднегодовые концентрации биогенных элементов в воде притоков Онежского озера по данным наблюдений в 2007–2008 гг.

Река	Q, км³/год	ρ	P _{мин}	P _{общ}	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{орг}	N _{общ}
			мкг/л		мгN/л				
Суна	0,02	0,001	65	96	0,06	0,002	0,04	0,56	0,66
Кондопожский канал	2,32	0,155	1	11	0,03	0,002	0,10	0,34	0,47
Лижма	0,28	0,019	2	12	0,03	0,002	0,03	0,46	0,52
Уница	0,13	0,009	3	22	0,06	0,002	0,07	0,48	0,61
Кумса	0,26	0,018	2	17	0,04	0,002	0,07	0,36	0,47
Вичка	0,04	0,003	2	21	0,06	0,003	0,26	0,39	0,71
Сапеница	0,05	0,003	11	48	0,05	0,002	0,14	0,48	0,67
ББК	0,35	0,023	3	34	0,06	0,001	0,02	0,36	0,44
Немина	0,29	0,020	24	59	0,06	0,001	0,04	0,50	0,60
Пяльма	0,37	0,025	8	34	0,04	0,001	0,05	0,55	0,64
Туба	0,12	0,008	3	23	0,05	0,001	0,05	0,56	0,66
Водла	4,63	0,310	8	38	0,04	0,001	0,04	0,56	0,64
Черная	0,25	0,017	23	78	0,10	0,002	0,05	0,68	0,83
Андома	1,09	0,073	13	57	0,04	0,001	0,07	0,49	0,60
Вытегра	0,58	0,039	21	72	0,05	0,007	0,17	0,40	0,62
Мегра	0,57	0,038	17	62	0,04	0,002	0,05	0,57	0,66
Водлица	0,15	0,010	10	50	0,04	0,002	0,05	0,57	0,66
Ошта	0,11	0,007	8	39	0,05	0,002	0,12	0,38	0,55
Гимрека	0,02	0,001	24	68	0,06	0,002	0,02	0,67	0,75
Рыбрека	0,01	0,001	11	55	0,06	0,003	0,10	0,66	0,82
Шокса	0,04	0,003	20	57	0,07	0,002	0,13	0,58	0,78
Пухта	0,04	0,003	12	43	0,05	0,002	0,02	0,74	0,81
Уя	0,02	0,001	4	24	0,03	0,002	0,04	0,64	0,71
Деревянка	0,03	0,002	42	73	0,05	0,005	0,19	0,60	0,84
Орзег	0,02	0,001	35	75	0,24	0,002	0,01	0,45	0,70
Нелукса	0,01	0,001	10	31	0,36	0,005	1,13	1,97	3,46
Лососинка	0,11	0,007	38	69	0,04	0,004	0,16	0,52	0,73
Неглинка	0,02	0,001	51	80	0,07	0,010	1,21	1,23	2,52
Шуя	3,00	0,201	10	41	0,09	0,001	0,06	0,37	0,52
Всего	14,93	1,000							
Средневзвешенные концентрации			9,2	37,9	0,052	0,002	0,067	0,467	0,59
Вынос (фосфор – т/год, формы N – тN/год)	17,3	1,000	159	656	900	34,6	1159	8079	10172

Примечание. ρ – доля водного стока; P_{общ} – общее содержание всех форм фосфора в нефильтрованных пробах воды.

Таблица 2. Содержание и выпадение биогенных элементов с атмосферными осадками на территорию Карелии

Район	P _{мин}	P _{общ}	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{орг}	N _{общ}
	мкг/л		мгN/л				
Центральный	1	10	0,075	0,001	0,18	0,06	0,32
Южный	3	8	0,114	0,001	0,24	0,06	0,41
Восточный	1	11	0,107	0,001	0,18	0,04	0,33
Среднее	2	10	0,10	0,001	0,20	0,05	0,35
Выпадения (P – т/год, формы N – тN/год)	12,8	64,0	640	6,4	1280	320	2246
% от общих форм	19	100	29	0,3	57	14	100

Как видно из табл. 2, выпадение $P_{\text{общ}}$ составляет 64 т/год, $N_{\text{общ}}$ – 2240 т/год. С атмосферными осадками поступает значительное количество нитратов (57 % от $N_{\text{общ}}$), на втором месте находится NH_4^+ (29 %) и на третьем – $N_{\text{орг}}$ (14 %). Таким образом, в выпадениях с осадками преобладают минеральные формы азота, а не органические, как это имеет место в поверхностных водах Карелии, в том числе и в притоках Онежского озера.

*Водный и биогенный подземный сток
в озеро, минуя речную сеть*

В расчете водного и химического баланса озер Карелии, в том числе и Онежского озера, приход подземных вод количественно учтен в объеме среднемноголетнего речного стока [Иешина и др., 1987]. Прямой же приток подземных вод с прибрежной территории, не подверженной дренирующему воздействию рек и ручьев, не принимался во внимание. Но именно в этой части водосборной площади озер располагаются основные очаги загрязнения подземных вод: урбанизированные и сельскохозяйственные территории, свалки, карьеры и другие хозяйственные объекты.

В пределах основных водоносных комплексов побережья озера выделены участки со сходными гидрогеологическими условиями, в пределах которых гидродинамическим методом рассчитаны расходы потоков подземных вод, направленных непосредственно в озеро, минуя речную сеть. Этим методом рассчитан общий подземный сток в Онежское озеро в объеме 140,3 млн м³/год [Бородулина, 2011]. Для оценки загрязненного подземного (грунтового) стока была выделена общая ширина фронта потока с селитебных прибрежных территорий (152 км), что составляет 8,4 % от

общей длины береговой линии озера. Загрязненный сток формируется в верхней гидрогеохимической зоне, средняя мощность водоносных отложений составила 10 м, средние коэффициенты фильтрации для озерно-ледниковых и ледниковых супесчаных отложений принимались 0,3 м/сут, для флювиогляциальных – 4 м/сут, средний гидравлический уклон 0,01. Расчетный подземный сток с селитебных территорий составил 3,21 млн м³/год.

Для расчета загрязненного грунтового стока с селитебных территорий приняты средние величины содержания биогенных соединений в колодцах и родниках населенных пунктов прибрежной зоны озера. Для расчета поступления с природной части водосбора приняты региональные медианные концентрации соединений азота и фосфора. В отличие от фоновых территорий, где содержание азотных соединений невысокое (0,01–0,1 мгN/л), в пределах населенных пунктов нитратное загрязнение часто достигает значительной интенсивности и даже критической (>10 мгN/л), средняя концентрация составляет 8,14 мгN/л (табл. 3). Источником нитратного загрязнения являются хозяйственно-бытовые отходы [Лозовик, Бородулина, 2009].

Содержание фосфора в подземных водах изменяется в широком диапазоне (от микрограммовых количеств до 4 мг/л), но в целом низкое и сравнимо с фоновыми концентрациями в поверхностных водах (17 мкг/л) [Лозовик, 2006]. В отличие от поверхностных вод, в которых преобладающей формой является органо-железосвязанный фосфор, в подземных ведущая роль принадлежит минеральным формам [Бородулина, 2012]. Средние концентрации $P_{\text{общ}}$ и $P_{\text{мин}}$ в пробах грунтовых вод селитебной территории составили 25 и 19 мкг/л соответственно.

Таблица 3. Вынос азота с подземным стоком в Онежское озеро

Расчетные территории	Водный сток, млн м ³ /год	NO ₃ ⁻		NO ₂ ⁻		NH ₄ ⁺		Всего N, т/год
		С, мгN/л	Вынос, т/год	С, мгN/л	Вынос, т/год	С, мгN/л	Вынос, т/год	
Загрязненные	3,2	8,14	26,1	0,02	<0,1	0,07	0,2	26,4
Природные	137,1	0,11	15,1	0,01	1,4	0,13	17,8	34,3
Вся территория стока	140,3	0,29	41,2	0,01	1,4	0,13	18,0	60,7

Таблица 4. Вынос фосфора с подземным стоком в Онежское озеро

Расчетные территории	Водный сток, млн м ³ /год	P _{мин}		P _{общ}	
		С, мкг/л	Вынос, т/год	С, мкг/л	Вынос, т/год
Загрязненные	3,2	19	<0,1	25	<0,1
Природные	137,1	13	1,8	17	2,3
Вся территория стока	140,3	13	1,8	17	2,4

Результаты расчета выноса биогенных элементов с подземным стоком представлены в табл. 3 и 4.

На основании проведенных расчетов установлено, что, несмотря на относительно небольшое количество загрязненных подземных вод (2 %), поступающих непосредственно в озеро, вынос азота с ними сравним с его поступлением с остальной прибрежной территории. Поступление фосфора происходит в основном с природных территорий.

Биогенный сток от точечных источников загрязнения

При расчете биогенного стока от точечных источников загрязнения учитывалось, что часть сточных вод поступает через водовыпуски непосредственно в озеро, а часть – в водные объекты, расположенные на его водосборе. Точечные источники загрязнения, расположенные на водосборе, учитываются в химическом стоке рек, а расположенные на побережье следует принимать во внимание при оценке внешней биогенной нагрузки на водоем. Для объективной оценки биогенной нагрузки от точечных источников загрязнения необходимо брать данные по водоотведению за 2007–2008 гг., поскольку речной сток оценен

для этого периода. Следует отметить, что объем сточных вод в настоящее время существенно сократился по сравнению с 2007–2008 гг. в связи с введением контроля коммунального водопотребления, экономного расхода воды потребителями и ряда социально-экономических причин. Что касается данных о химическом составе сточных вод, то здесь существует большая проблема. К сожалению, данные статистичности «2ТП-водхоз» для расчета использовать нельзя. Во-первых, в них отсутствуют сведения по содержанию $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$, необходимые для оценки биогенной нагрузки на озеро. Во-вторых, нет уверенности в достоверности значений содержания остальных контролируемых элементов. Поэтому в работе использованы данные по составу сточных вод, полученные ИВПС КарНЦ РАН.

В целом в бассейне Онежского озера было обследовано 15 выпусков сточных вод, составляющих 71 % от общего объема водоотведения. Из числа обследованных выпусков в 12 имеются биологические очистные сооружения, в 3 пунктах (г. Медвежьегорск, о. Киж и ТЭЦ г. Петрозаводска) сточные воды сбрасываются без очистки. Судя по результатам определения органического вещества, взвешенных веществ и БЭ (табл. 5), в 7 пунктах биологические очистные сооружения работают неэффективно,

Таблица 5. Содержание биогенных элементов в сточных водах

Сточные воды населенных пунктов	ρ^*	$P_{\text{мин}}$	$P_{\text{общ}}$	NH_4^+	NO_2^-	NO_3^-	$N_{\text{орг}}$	$N_{\text{общ}}$
		мкг/л		мгN/л				
г. Кондопога, ОАО «Кондопога»	0,686	300	665	0,36	0,009	6,7	8,6	15,7
г. Петрозаводск, ОАО «Петрозаводские коммунальные системы»	0,265	3984	4256	4,4	0,120	19,2	1,6	25,3
пос. Пудож, ООО «Пудожское ВХК»	0,008	6037	6768	73,2	0,001	0,02	8,0	81,2
г. Медвежьегорск, ООО «Водоканал»	0,012	3543	4462	22,7	<0,001	0,01	12,6	35,3
о. Киж, Пожарная часть № 14	0,004	9	9	0,03	0,001	0,03	0,7	0,76
г. Петрозаводск, ТЭЦ	0,003	149	426	0,05	<0,001	0,82	1,4	2,3
пос. Марциальные Воды ООО «Санаторий Марциальные воды»	0,003	675	825	21,8	0,048	15,8	2,4	40,0
пос. Шуя, ОАО «Петрозаводские коммунальные системы»	0,001	6112	6487	61,5	0,126	16,5	3,4	80,5
пос. Новая Вилга, ОАО «Петрозаводские коммунальные системы»	0,001	5615	6524	46,6	0,001	0,27	6,3	53,2
пос. Мелиоративный, ОАО «Петрозаводские коммунальные системы»	0,002	53	459	4,6	0,139	8,1	1,6	16,2
пос. Пиндуши, ООО «Водоканал»	0,006	2775	3394	26,3	0,001	<0,01	10,1	36,4
пос. Матросы, ООО «Рубин»	0,001	3872	4040	43,3	0,004	13,0	3,8	60,1
пос. Эссойла, ЗАО «Эссойла»	0,001	4612	4594	39,6	0,463	6,3	5,7	52,1
пос. Деревянка, ОАО «Петрозаводские коммунальные системы»	0,001	1612	1996	23,9	0,023	16,6	1,9	42,4
г. Суоярви, ООО «Экотехнология»	0,004	1238	1364	0,42	0,059	23,5	5,7	29,7
Средневзвешенные концентрации		1399	1699	2,7	0,04	9,9	6,7	19,34

Примечание. ρ^* – доля сточных вод в общем объеме обследованных источников.

Таблица 6. Биогенная нагрузка в бассейне Онежского озера от точечных источников загрязнения

Сточные воды	объем, тыс. м³/год	Р _{мин}	Р _{общ}	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{орг}	N _{общ}
		т/год		тN/год				
Прямой сброс в озеро	102576	144	174	277	4,1	1016	687	1984
Фон		0,6	2,9	4,1	0,2	3,1	42,1	49,4
Истинное значение		143	171	273	3,9	1013	645	1935
На водосборе	39085	54,6	66,4	106	1,6	387	262	757
Фон		0,2	1,1	1,6	0,1	1,2	16,0	18,8
Истинное значение		54,4	65,3	104	1,5	386	246	738
Всего	141661	199	240	383	5,7	1403	949	2741
Истинное значение		197	236	377	5,4	1399	891	2673
% от общих форм по истинным значениям		83	100	14	0,2	52	33	100

Таблица 7. Химический состав дренажных и ливневых вод г. Петрозаводска

Объекты	Р _{мин}	Р _{общ}	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	N _{общ}
	мкг/л		мгN/л		
Ручей Студенец	21	70	0,08	3,79	14,40
Труба по ул. Мелентьевой	94	135	0,35	3,14	5,66
Труба по ул. Московской	133	160	0,40	2,71	5,22
Труба по ул. Еремеева	100	110	0,07	2,52	6,03
Остальные водовыпуски (средние значения по 5 выпускам)	40	66	0,16	0,76	2,50
Средняя концентрация	78	108	0,21	2,58	6,76

а правильнее будет сказать – вообще не работают. Так, величина БПК₅ в этих выпусках достигала 13–184 мгО₂/л, содержание NH₄⁺ – 23–73 мгN/л, а NO₃⁻ – до 6 мгN/л, взвешенных веществ – 88–350 мг/л. Более низкое содержание NO₃⁻ по сравнению с NH₄⁺ наряду с высокими значениями БПК₅ и содержанием взвешенных веществ свидетельствует об отсутствии аэробной очистки сточных вод.

На основании химического состава сточных вод и их объема (по средним данным за 2007 и 2008 гг.) было рассчитано поступление БЭ в бассейн Онежского озера от точечных источников загрязнения, расположенных на побережье озера и его водосборе, сток от которых поступает в озеро с речными водами. В расчетах учтен вклад фоновое поступления БЭ в сточные воды, которое определялось по природным концентрациям БЭ в речных водах. По разности общего и фонового оценивалось собственно антропогенное поступление от точечных источников (табл. 6). Для оценки суммарного объема сточных вод, поступающих на водосбор Онежского озера и непосредственно в озеро, использовались данные статистической отчетности «2ТП-водхоз» за 2007–2008 гг. для Карелии и Вытегорского района Вологодской обл.

Как видно из таблицы 6, поступление БЭ непосредственно в озеро со сточными водами более чем в 3 раза выше, чем с водосбора, поскольку 72 % от общего водоотведения

приходится на промышленные центры, расположенные на побережье озера (Петрозаводск, Кондопога, Медвежьегорск, Пиндуши). Сток Р_{общ} от всех точечных источников загрязнения составил 236 т/год, а N_{общ} – 2673 т/год. Доля минеральных форм в поступлении Р_{общ} составляет 83 %, а в стоке N_{общ} превалирует NO₃⁻ (52 %) и N_{орг} (33 %), на NH₄⁺ приходится 14 %, а на сток NO₂⁻ – менее 1 %.

Биогенный сток с селитебных территорий

Для оценки биогенного стока с селитебных территорий использовались данные по химическому составу дренажных и ливневых вод с территории г. Петрозаводска [Современное состояние..., 1998] (табл. 7). Для остальных селитебных территорий на водосборе озера использовались эти же данные, поскольку обследование их не проводилось.

Для селитебных территорий также необходимо отдельно рассчитывать сток с прибрежных участков, с которых он поступает непосредственно в озеро, и с водосбора озера в речную сеть. Объем стока с селитебных территорий на побережье озера (площадь 144,4 км², население 328 тыс. человек, средний слой стока 388 мм) равен 56 027 тыс. м³. Условно принимая для остальной части бассейна с численностью населения 62 тыс. человек плотность застройки аналогично городской, получаем значение площади селитебных территорий

Таблица 8. Биогенный сток с селитебных территорий в бассейне Онежского озера

Селитебные территории	V, тыс. м³/год	P _{мин}	P _{общ}	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{орг}	N _{общ}
		т/год		тN/год				
Расположенные на побережье	56027	4,4	6,1	11,8	0,6	145	222	379
Фон		0,3	1,6	2,2	0,1	1,7	23,0	27,0
Истинное значение		4,1	4,5	9,6	0,5	143	199	352
Расположенные на водосборе	9770	0,8	1,1	2,1	0,1	25,2	38,8	66,2
Фон		0,1	0,3	0,4	0,02	0,3	4,0	4,7
Истинное значение		0,7	0,8	1,7	0,1	24,9	34,8	61,5
Всего	65797	5,2	7,2	13,9	0,7	170	261	445
Истинное значение		4,8	5,3	11,3	0,6	168	234	414
% от общих форм по истинным значениям		91	100	3	0,1	41	57	100

Таблица 9. Биогенные элементы в воде р. Нелуксы и мелиоративной канавы

Объект	P _{мин}	P _{общ}	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{орг}	N _{общ}
	мкг/л		мгN/л				
Мелиоративная канава	301	526	3,20	0,50	15,0	9,8	28,5
р. Нелукса (исток из оз. Уварово)	27	89	0,22	0,001	0,01	0,27	0,50
р. Нелукса (ниже впадения мелиоративной канавы)	7	31	0,79	0,046	3,69	1,32	5,85
р. Нелукса (устье)	3	22	0,03	0,001	0,66	0,89	1,58

Таблица 10. Биогенный сток со свалок в бассейне Онежского озера

Нагрузка	P _{мин}	P _{общ}	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{орг}	N _{общ}
	т/год		тN/год				
Общая	1,2	2,1	12,6	2,0	59,1	38,6	112
Фон	0,02	0,1	0,16	0,01	0,12	1,6	1,9
Истинное значение	1,2	2,0	12,4	2,0	59,0	37,0	110
% от общих форм по истинным значениям	60	100	11	2	54	34	100

27,1 км². Тогда сток с селитебных территорий на водосборе при среднем слое стока 360 мм составит 9770 тыс. м³.

Слой стока (Y) с селитебных территорий определялся по уравнению водного баланса для многолетнего периода ($Y = P - E$), при этом суммарное испарение (E) определялось с учетом влияний различных элементов территорий [Карпечко, 2004], а осадки (P) – по ближайшим метеостанциям. Разница в слоях стока с селитебных территорий побережий (388 мм) и с территорий, расположенных на остальной части водосбора (360 мм), обусловлена в основном различием в количестве осадков.

С учетом фоновых концентраций в речных водах рассчитано антропогенное поступление БЭ с селитебных территорий в бассейне Онежского озера (табл. 8). Его величина относительно невелика: $P_{общ} - 5,3$ т/год, $N_{общ} - 414$ т/год. В стоке $P_{общ}$ 91 % приходится на $P_{мин}$, а в стоке $N_{общ} - 57$ % на $N_{орг}$ и 41 % на NO_3^- . Незначительны доли NH_4^+ (3 %) и NO_2^- (0,1 %). Такая картина распределения в стоке форм азота является закономерной, поскольку дренажные и ливневые воды с селитебных территорий

хорошо насыщены кислородом и процесс нитрификации в них заканчивается образованием нитратов.

Водный и биогенный сток с территории свалок

В бассейне Онежского озера находятся в основном свалки бытовых и строительных отходов. Промышленных свалок практически нет в связи с незначительными объемами производства. Поскольку сток со свалок поступает в основном в речную сеть, то их влияние рассматривается только на водосборе, и оно опосредованно учитывается в биогенном стоке рек.

Слой стока с территории свалки вблизи г. Петрозаводска составляет 350 мм. Эта величина была получена при осреднении стока расположенных вблизи города рек, на которых проводятся наблюдения за расходом воды. Для остальной территории водосбора Онежского озера слой стока можно принять равным 322 мм. Данное значение получено при осреднении стока всех изученных рек водосбора Онежского озера.

Таблица 11. Поступление биогенных элементов от форелеводческих хозяйств в бассейне Онежского озера

Расположение хозяйств	Товарная продукция, т	P _{мин}	P _{общ}	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	N _{орг}	N _{общ}
		т/год		тN/год			
На акватории озера	3213	19,3	25,7	20	20	121	161
На водоемах водосбора	2535	15,2	20,3	16	16	95	127
Всего	5748	34,5	46,0	36	36	216	288

Таблица 12. Поступление биогенных элементов в Онежское озеро

Источник	P _{мин}	P _{общ}	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{орг}	N _{общ}
	т/год		тN/год				
Речные воды	159	657	900	34,6	1159	8079	10173
Атмосферные осадки	12,8	64,0	640	6,4	1280	320	2246
Подземные воды	1,9	2,4	18	1,4	41,2	-	60,6
Сточные воды	144	174	277	4,1	1016	687	1984
Селитебные территории	4,4	6,1	11,8	0,6	145	222	379
Форелевые хозяйства	15,2	20,3	20	-	20	121	161
Итого	337	924	1867	47,1	3661	9429	15004
% от общих форм	36	100	12	0,3	24	63	100
Средневзвешенная концентрация в приточных водах (по стоку из озера) (P – мкг/л, формы N – мгN/л)	17,9	49,1	0,10	0,003	0,20	0,50	0,80
Удерживающая способность озера (R)	0,89	0,79	0,80	-	-	0,70	0,35

Данные по составу дренажных вод, поступающих со свалки г. Петрозаводска в мелиоративную канаву, и воды их водоприемника – р. Нелуксы, впадающей в Онежское озеро, приведены в таблице 9.

Наибольшее влияние свалки сказывается на химическом составе воды мелиоративной канавы, тогда как при впадении ее в р. Нелуксу показатели существенно уменьшаются и к устью становятся близкими к речным водам бассейна. Площадь водосбора мелиоративной канавы до точки отбора пробы составила 7,94 км², а объем стока – 2778 тыс. м³. Для всего бассейна условный объем стока с территории свалок рассчитан пропорционально численности населения: $2778 \cdot 390 / 275 = 3940$ тыс. м³. Такое приближение обусловлено отсутствием данных по другим свалкам на водосборе Онежского озера. В таблице 10 приведен расчетный вынос БЭ с территории свалок в бассейне Онежского озера.

В сравнении с общим речным биогенным стоком с территории свалок поступает незначительное количество биогенных элементов. В стоке P_{общ} доля минерального составляет 60 %, а в стоке N_{общ} доминируют NO₃⁻ (54 %). Меньшую долю составляют N_{орг} (34 %) и NH₄⁺ (11 %), на NO₂⁻ приходится всего 2 %.

Поступление биогенных элементов от рыбоводческих хозяйств

В Карелии в последние годы получило бурное развитие товарное рыбоводство на

внутренних водоемах (преимущественно форелеводство). По объему производимой продукции Карелия занимает первое место в России. Так, в 2014 г. было выращено 15,8 тыс. т товарной форели, в том числе на акватории Онежского озера 4,5 тыс. т и на водоемах его бассейна 3,5 тыс. т. Поскольку речной биогенный сток оценен для 2007–2008 гг., то и объем выращивания форели принят для этих лет (3213 т/год на акватории озера и 2535 т/год на водоемах его бассейна). Для оценки биогенной нагрузки от форелеводческих хозяйств использованы данные выноса БЭ с 1 т товарной продукции (8 кг P_{общ} и 50 кг N_{общ}), полученные авторами [Китаев и др., 2006] по пяти методикам. Эти величины близки к рекомендациям ХЕЛКОМ: 7 кг P_{общ} и 50 кг N_{общ} на 1 т товарной продукции [HELCOM..., 2007]. К сожалению, в обоих случаях отсутствуют данные по выносу отдельных форм БЭ. Чтобы получить единую со всеми рассмотренными антропогенными источниками картину по стоку БЭ, примем, что на P_{мин} и N_{орг} приходится 75 % от общих форм, а на NH₄⁺ и NO₃⁻ – 25 % в равных долях. Результаты выполненных расчетов с учетом распределения форм БЭ приведены в таблице 11. Итоговая величина выноса от форелеводческих хозяйств в 2007–2008 гг. P_{общ} составила 40 т/год, N_{общ} – 288 т/год.

Биогенная нагрузка на Онежское озеро

Для достоверной оценки биогенной нагрузки на водоем требуется информация по

поступлению веществ от всех источников формирования химического состава воды. Применительно к Онежскому озеру у нас имеются данные по поступлению БЭ с речными водами, атмосферными осадками, со сточными и подземными водами, поступающими непосредственно в озеро, с прибрежных селитебных территорий и от рыбоводческих хозяйств, расположенных на акватории озера. В речном химическом стоке отражается поступление БЭ не только с неосвоенных территорий, но и от всех антропогенных источников, расположенных на его водосборе, в том числе и от сельскохозяйственных объектов. В таблице 12 представлено поступление БЭ в Онежское озеро от всех указанных выше источников.

В целом поступление $P_{\text{общ}}$ в озеро составляет 924 т/год, а $N_{\text{общ}}$ – 15004 т/год. Наибольшее количество БЭ приносят речные воды (около 70 %) и наименьшее – подземные воды, разгружающиеся непосредственно в озеро (<1 %). Существенный вклад в баланс $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{орг}}$ вносят сточные воды (19 % от всего стока $P_{\text{общ}}$ и 13 % от стока $N_{\text{общ}}$) и атмосферные осадки (7 % $P_{\text{общ}}$ и 15 % $N_{\text{общ}}$). В общем стоке доля $P_{\text{мин}}$ выше, чем в речном, и составляет 36 % $P_{\text{общ}}$, а в общем стоке $N_{\text{общ}}$ отмечается более высокая доля минеральных форм (NO_3^- 24 %, NH_4^+ 12 %) и меньшая органических (63 %), чем в речном стоке (79 %).

Имеющиеся данные по балансу БЭ позволяют оценить удерживающую способность озера (R) по этим элементам: $R = (C_{\text{прит}} - C_{\text{оз}}) / C_{\text{оз}}$, где $C_{\text{прит}}$ и $C_{\text{оз}}$ – средневзвешенная концентрация вещества в приточных водах и в озере соответственно. Под приточными водами в данном случае понимаются все виды вод, поступающие в озеро (речные, подземные, сточные, дренажные, ливневые, атмосферные осадки).

Наибольший интерес представляет удерживающая способность озера к $P_{\text{общ}}$, как основному лимитирующему биогенному элементу, и $N_{\text{орг}}$, как главному компоненту, отражающему трансформацию соединений азота в озере. Содержание NO_3^- в озере выше, чем в приточных водах, и это связано с превращением $N_{\text{орг}}$ в нитраты в ходе процессов аммонификации и нитрификации. Органическое вещество в озере представлено автохтонным и аллохтонным ОВ, в состав которых входит $N_{\text{орг}}$. При образовании автохтонного ОВ потребляются в основном нитраты. Поэтому удерживающую способность озера к $N_{\text{орг}}$ следует рассматривать по отношению к $N_{\text{орг}}$, входящему в состав аллохтонного ОВ. Учитывая, что доля аллохтонного ОВ в озере составляет 60 %, примем эту величину и за долю аллохтонного $N_{\text{орг}}$. Тогда концентрация $N_{\text{орг}}$ аллохтонного происхождения составит

0,15 мг/л, а удерживающая способность к азоту в аллохтонном ОВ: $R = 0,70$.

Используя формулу связи удерживающей способности с периодом водообмена озера (τ) и константой скорости трансформации веществ (k) в озере $R = k\tau / (1 + k\tau e^{-1/\tau})$ [Лозовик, 2015a], можно рассчитать указанную константу и ассимиляцию вещества в водоеме (As): $As = kC_{\text{оз}}V_{\text{стока}}(\tau + 1)$ [Лозовик, 2015б]. Выполненные расчеты дали следующие значения: $k(P_{\text{общ}}) = 0,194 \text{ год}^{-1}$, $k(N_{\text{орг}})_{\text{алл}} = 0,130 \text{ год}^{-1}$, $As(P_{\text{общ}}) = 624 \text{ т/год}$, $As(N_{\text{орг}})_{\text{алл}} = 6122 \text{ т/год}$.

На основании проведенных расчетов установлено, что в год в озерной котловине ассимилируется 624 т $P_{\text{общ}}$ (67 % от его внешнего поступления), а азота органического – 6122 т (65 %). Таким образом, благодаря внутриводоемным процессам существенно снижается концентрации $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$, поступающих в озеро с приточными водами.

Согласно полученным константам скорости трансформации $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{орг}}$, периоды полупревращения этих элементов составляют 3,6 и 5,3 года соответственно. Установленные значения указывают, что трансформация соединений фосфора и азота в речных водах происходит очень медленно, и можно с полной уверенностью считать, что БЭ, которые поступают от антропогенных источников в речную сеть на водосборе озера, привносятся в Онежское озеро практически без изменения.

Биогенная нагрузка на Онежское озеро от сельскохозяйственных объектов

Оценка биогенной нагрузки на озеро от сельскохозяйственных объектов и других видов хозяйственной деятельности на водосборе, основанная на показателях выноса БЭ от различных источников, в настоящее время является достаточно сложной задачей. Сказанное объясняется недостаточностью и труднодоступностью исходной информации, необходимой для выполнения расчетов. Преодолеть возникшие сложности с информационным обеспечением и оценить биогенную нагрузку на Онежское озеро без использования данных государственной статистической отчетности можно на основе косвенного метода оценки нагрузки, разработанного в ИВПС КарНЦ РАН и базирующегося на балансовых соотношениях с учетом знания фоновой составляющей нагрузки.

Для определения фоновой концентрации $P_{\text{общ}}$ в притоках озера воспользуемся геохимической классификацией водных объектов по их щелочности и гумусности [Лозовик, 2013]. Для различных классов гумусности и щелочности

Таблица 13. Геохимическая классификация притоков Онежского озера и фоновые концентрации $P_{\text{общ}}$ в их воде по данным наблюдений в 2007–2008 гг.

Река	Alk, мгHCO ₃ ⁻ /л	Hum	Геохимический класс	$P_{\text{общ}}$ набл.	$P_{\text{общ}}$ фон
				мкг/л	
Суна	51,2	37	мезополигумусный среднещелочностной	96	35
Кондопожский канал	8,6	26	мезогумусный среднещелочностной	11	11*
Лижма	21,6	20	мезогумусный среднещелочностной	12	12*
Уница	12,6	70	мезополигумусный среднещелочностной	22	22*
Кумса	19,6	33	мезогумусный среднещелочностной	17	17*
Вичка	29,5	35	мезополигумусный среднещелочностной	21	21*
Сапеница	20,9	66	мезополигумусный среднещелочностной	48	35
ББК	9,7	41	мезополигумусный среднещелочностной	34	34*
Немина	10,2	60	мезополигумусный среднещелочностной	59	35
Пяльма	21,8	70	мезополигумусный среднещелочностной	34	34*
Туба	21,5	52	мезополигумусный среднещелочностной	23	23*
Водла	14,0	56	мезополигумусный среднещелочностной	38	35
Черная	24,6	97	полигумусный среднещелочностной	78	48
Андома	22,2	68	мезополигумусный среднещелочностной	57	35
Вытегра	113,5	28	мезогумусный высокощелочностной	72	30
Мегра	45,6	68	мезополигумусный среднещелочностной	62	35
Водлица	16,7	72	мезополигумусный среднещелочностной	50	35
Ошта	55,5	43	мезополигумусный среднещелочностной	39	35
Гимрека	15,1	95	полигумусный среднещелочностной	68	48
Рыбрека	14,6	81	полигумусный среднещелочностной	55	48
Шокша	27,0	73	полигумусный среднещелочностной	57	48
Пухта	17,3	71	мезополигумусный среднещелочностной	43	35

Примечание. *Для рек, у которых фоновые концентрации $P_{\text{общ}}$ по геохимическим классам воды были выше наблюдаемых, в качестве фоновых принимались последние.

установлены фоновые концентрации $P_{\text{общ}}$ для природных поверхностных вод Карелии (рис. 3) [Лозовик, 2006].

С использованием фоновых концентраций $P_{\text{общ}}$ для различных притоков Онежского озера (табл. 13) установлена фоновая средневзвешенная по объему концентрация $P_{\text{общ}}$ в притоках озера, которая составляет 30,1 мкг/л.

Второй способ расчета средневзвешенной фоновой концентрации $P_{\text{общ}}$ в притоках может быть выполнен по удерживающей способности и по фоновой концентрации $P_{\text{общ}}$ в озере (6 мкг/л). Тогда средневзвешенная фоновая концентрация $P_{\text{общ}}$ в приточных водах составит 28,6 мкг/л, а фоновое количество $P_{\text{общ}}$

в притоках озера, рассчитанное по объему стока из озера (18,8 км³/год) за вычетом его выпадений с осадками и поступлений с подземными водами, равно 471,2 т/год. Расчетная фоновая концентрация $P_{\text{общ}}$ в речных водах (приток 17,3 км³/год) составит 27,2 мкг/л.

Средняя фоновая концентрация $P_{\text{общ}}$ в притоках Онежского озера по двум вариантам расчета 28,7 мкг/л. За фоновую концентрацию $P_{\text{мин}}$ примем 20 % от $P_{\text{общ}}$ (5,7 мкг/л).

Что касается определения фоновых концентраций форм азота, то здесь ситуация более сложная, чем с $P_{\text{общ}}$. По вышеуказанной классификации вод не получено существенных отличий в их распределении. Поэтому приходится

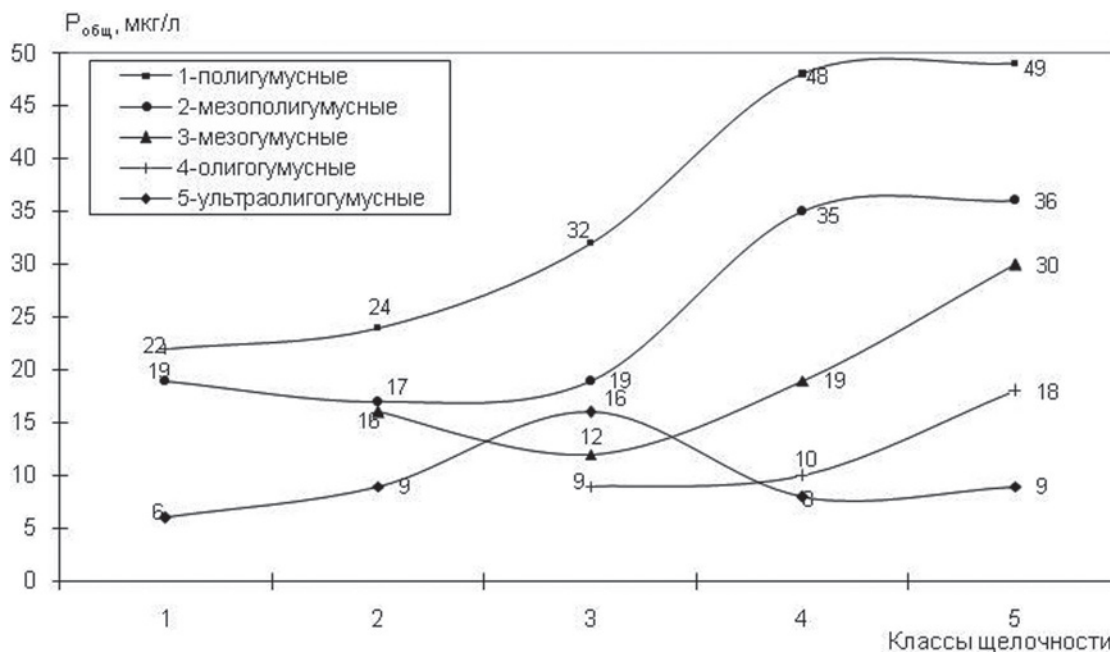


Рис. 3. Распределение средних значений содержания $P_{\text{общ}}$ по классам гумусности и щелочности. Классы щелочности и pH: 1 – бесщелочностные кислые, 2 – низкощелочностные слабокислые, 3 – слабощелочностные слабокислые, 4 – среднещелочностные циркумнейтральные, 5 – слабощелочностные слабощелочные

ориентироваться на геохимические особенности поверхностных вод Карелии. Для чистых незагрязненных рек известно среднее содержание, мгN/л: NH_4^+ – 0,04; NO_2^- – 0,002; NO_3^- – 0,03 [Лозовик, 2006]. Низкое содержание NH_4^+ обусловлено тем, что скорость нитрификации выше, чем скорость аммонификации [Рыжаков, 2012], поэтому в воде, насыщенной кислородом, не происходит накопления NH_4^+ . Повышенные концентрации NO_2^- (>5 мкгN/л) в природных водах также маловероятны, поскольку скорость II стадии нитрификации ($\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$) выше скорости I стадии ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$). Содержание $N_{\text{орг}}$ в природных водах зависит в первую очередь от количества органического вещества, поэтому использование среднерегиональных концентраций $N_{\text{орг}}$ для притоков Онежского озера не является оправданным. Единственный выход – попытаться рассчитать фоновую концентрацию $N_{\text{орг}}$ в притоках по удерживающей способности озера к этому элементу. За природную фоновую концентрацию ($N_{\text{орг}}^{\text{фол}}$) примем его содержание в воде озера в современный период (0,15 мг/л). Это является вполне обоснованным, поскольку в озере наблюдаются стабильные и постоянные концентрации форм азота. Антропогенное влияние на озеро не привело еще к изменению содержания соединений азота [Сабылина, 2007].

По аналогии с расчетом фоновой концентрации $P_{\text{общ}}$ по удерживающей способности получим величину фоновой концентрации $N_{\text{орг}}$

в приточных водах (0,50 мг/л). Тогда общее поступление $N_{\text{орг}}$ с приточными водами (объем 18,8 км³) составит 9400 т/год, а с вычетом поступлений с атмосферными осадками и подземным стоком – 7093 т. Фоновая концентрация в речных водах (объем 17,3 км³) составит 0,41 мг/л. В отличие от расчета фоновой концентрации фосфора для азота в атмосферных осадках и подземных водах принималось его общее содержание с допущением, что минеральные формы в озере перейдут в органическую. Фоновую концентрацию $N_{\text{общ}}$ в речных водах определим как сумму фоновых концентраций форм азота: 0,04 (NH_4^+) + 0,002 (NO_2^-) + 0,03 (NO_3^-) + 0,41 ($N_{\text{орг}}$) = 0,482 мг/л. Установленные фоновые концентрации БЭ в речных водах позволяют оценить природный биогенный речной сток в озеро, и в конечном итоге, используя балансовый метод, удастся вычислить нагрузку от сельско- и лесохозяйственных объектов. Биогенная нагрузка от последних рассчитана как разность между общим биогенным речным стоком и суммой его составляющих (табл. 14).

Расчеты показали, что антропогенный вынос $P_{\text{общ}}$ с сельско- и лесохозяйственных объектов на водосборе составляет 70 т/год (11 % от речного стока), а $N_{\text{общ}}$ – 988 т/год (10 %). Полученные значения оказались достаточно низкими, указанные объекты дают небольшой вклад в общую биогенную нагрузку на озеро, поскольку сельское хозяйство в бассейне

Таблица 14. Биогенный сток с сельско- и лесохозяйственных объектов

Источник	$P_{\text{мин}}$	$P_{\text{общ}}$	NH_4^+	NO_2^-	NO_3^-	$N_{\text{орг}}$	$N_{\text{общ}}$
	т/год		тN/год				
Сток	159	656	900	34,6	1159	8079	10175
в том числе:							
1. Природный речной сток	86,5	497	692	17,3	519	6920	8148
2. Сточные воды	54,4	65,3	104	1,5	386	246	738
3. Селитебные территории	0,8	1,1	1,7	0,1	24,9	34,8	61,5
4. Свалки	1,2	2,1	12,4	2,0	59,0	37,0	110
5. Форелевые хозяйства	15,2	20,3	16	-	16	95	127
Всего	158,1	585,8	826,1	20,9	1005	7333	9187
Сельско- и лесохозяйственные объекты	0,9	70,2	73,9	13,7	154	746	988
% от общих форм	1	100	7	1	16	76	100

Онежского озера развито слабо, количество земель сельскохозяйственного назначения невелико (около 5 % от площади водосбора), а лесное хозяйство слабо отражается на выносе веществ.

Низкую роль леса в формировании биогенной нагрузки на озеро можно объяснить тем, что количество потребляемых древостоем питательных веществ из почвы на прирост фитомассы превышает их возврат с опадом на протяжении длительного периода роста и развития леса [Казимиров и др., 1977]. Эта разница не компенсируется, как показали наши предварительные расчеты, поступлением минеральных веществ с атмосферными осадками. Значительное количество БЭ закрепляется в фитомассе древостоя. Некоторого увеличения биогенной нагрузки можно ожидать в первый год после сплошных рубок. Однако площадь ежегодных рубок составляет менее 1 % всей лесопокрывной части водосбора, и предварительные оценки показали, что на вынос биогенных веществ заметного влияния это воздействие не оказывает. В частности, после удаления соснового и елового древостоя в объемах расчетной лесосеки (объем вырубленного леса) увеличение выноса общего фосфора может составить соответственно от 0 до 22 т, а общего азота – от 25 до 80 т со всего водосбора.

Гидротехническая мелиорация для целей сельского и лесного хозяйства также не может существенно повлиять на поступление биогенных элементов в озеро, поскольку после ее проведения прошло около 30 лет. Выполненный анализ показал [Карпечко, 2004], что наиболее интенсивный преобразовательный процесс при гидроресурсомелиорации, которой охвачено около 5 % площади водосбора Онежского озера, продолжается не более 10 лет. В дальнейшем функционирование лесного биогеоценоза осуществляется уже на новом уровне его

развития, и в настоящее время формирование водного и химического стока на осушаемых болотах и заболоченных землях происходит так же, как и на остальных участках леса.

Оценка современной диффузной биогенной нагрузки на Онежское озеро с выделением ее естественной и антропогенной составляющих

Полученные в предыдущих разделах данные позволяют оценить современную диффузную биогенную нагрузку на Онежское озеро от природных и антропогенных источников. К природным отнесен диффузный вынос веществ с водосборной территории, находящейся в естественном состоянии, который можно рассчитать по фоновым концентрациям БЭ в притоках и объему речного стока в озеро. Кроме того, необходимо учитывать поступление БЭ с подземными водами, разгружающимися непосредственно в озеро. К диффузным природным источникам отнесены и атмосферные выпадения БЭ, поскольку для их расчета использовались данные по химическому составу атмосферных осадков Карелии на территориях, удаленных от промышленных центров.

К антропогенным диффузным источникам поступления БЭ отнесены селитебные территории, свалки бытовых и промышленных отходов, форелевые хозяйства, сельско- и лесохозяйственные объекты на водосборе озера (рис. 1).

Оценка диффузного поступления БЭ с водосборной территории Онежского озера выполнена для $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ (табл. 15).

Результаты оценки свидетельствуют, что для Онежского озера диффузное поступление БЭ связано в основном с природными источниками (около 85 %, как по $P_{\text{общ}}$, так и по $N_{\text{общ}}$). Роль антропогенных источников незначительная (менее 20 % от диффузной нагрузки $P_{\text{общ}}$

Таблица 15. Диффузная биогенная нагрузка на Онежское озеро с водосборной территории

Вид нагрузки	Р _{общ}		N _{общ}	
	т/год	%	т/год	%
<u>Природная</u> , в том числе	567	85	10491	86
– речной сток	497	72	8148	67
– атмосферные осадки	64	9	2240	18
– подземные воды	2,3	0,3	34,3	0,3
– техногенные воды (фон)	4,0	0,6	68,2	0,6
<u>Антропогенная</u> , в том числе	97,8	15	1665	14
– селитебные территории	5,3	0,8	440	3,2
– свалки	2,0	0,3	110	0,2
– форелевые хозяйства (на водосборе)	20,3	3	127	1
– сельско- и лесохозяйственные объекты	70,2	10	988	8
Общая диффузная нагрузка по натурным данным	670	100	12 156	100
Общая диффузная нагрузка по модели ILLM (50 % обеспеченности) (данные ИНОЗ РАН)	669		11 981	

и N_{общ}). В природную диффузную нагрузку наибольший вклад вносят речные воды (88 % по Р_{общ} и 78 % по N_{общ} от природной нагрузки). Существенна роль и атмосферных осадков (11 % по Р_{общ} и 21 % по N_{общ} от природной нагрузки). Что касается антропогенных источников, то наибольший вклад вносят сельско- и лесохозяйственные объекты (72 % по Р_{общ} и 59 % по N_{общ} от антропогенной нагрузки этими элементами), форелевые хозяйства по Р_{общ} (21 % от антропогенной нагрузки) и селитебные территории по N_{общ} (25 % от антропогенной нагрузки). К сожалению, отдельно установить вынос БЭ с сельско- и лесохозяйственных объектов не представляется возможным в связи с отсутствием необходимой информации.

Кроме того, в рамках исследований биогенной нагрузки на Онежское озеро проведены работы по моделированию формирования нагрузки общим азотом и общим фосфором от рассеянных источников. Расчеты выполнялись с использованием модели *ILLM–Institute of Limnology Load Model*, разработанной в Институте озероведения РАН на основе отечественного и зарубежного опыта моделирования стока и выноса биогенных веществ с водосборных территорий [Кондратьев и др., 2011], а также рекомендаций ХЕЛКОМ по оценке нагрузки на водные объекты бассейна Балтийского моря [Guidelines..., 2005]. Модель предназначена для решения задач, связанных с количественной оценкой биогенной нагрузки, сформированной точечными и рассеянными источниками загрязнения, и прогнозом ее изменения под влиянием возможных антропогенных и климатических изменений. Модель ориентирована на существующие ограниченные возможности информационного обеспечения со стороны системы государственного мониторинга водных объектов Роскомгидромета и структур государственной статистической отчетности о сбросах

сточных вод и сельскохозяйственной деятельности на водосборах РФ.

Нагрузка общим фосфором и общим азотом на водоем-водоприемник (L) со стороны водосбора рассчитывалась как сумма биогенной нагрузки на гидрографическую сеть водосбора, сформированную сельхозпредприятиями (L_{agr}), и нагрузку, сформированную естественными и антропогенными ландшафтами, не подверженными в настоящее время сельскохозяйственному воздействию (L_c). Кроме того, в формировании нагрузки принимают участие точечные источники загрязнения, сточные воды которых поступают в гидрографическую сеть (L_{p1}) и непосредственно в водоем-водоприемник (L_{p2}) [Кондратьев и др., 2011]:

$$L = (L_{agr} + L_c + L_{p1}) (1 - R) + L_{p2},$$

где R – безразмерный коэффициент удержания гидрографической сетью водосбора. Все остальные члены уравнения имеют размерность [т/год].

В качестве источника информации о площадях различных типов подстилающей поверхности, которые характеризуются различными значениями потока азота и фосфора с поверхностным стоком, удалось использовать результаты дешифрирования космических снимков, находящихся в режиме свободного доступа. Для распознавания типов поверхностей использовались данные семи каналов космического аппарата Landsat-8 (видимого и ближнего инфракрасного диапазонов съемки) и данные двух каналов космического аппарата Terra/MODIS. Идентифицировались следующие типы подстилающей поверхности: леса; поля; луга; болота; селитебные зоны, свалки и заброшенные территории; водные объекты. Значения стока азота и фосфора с указанных типов подстилающей поверхности задавались по результатам данных натурных исследований на

Таблица 16. Природная и антропогенная нагрузка на Онежское озеро

Вид нагрузки	Р _{общ}		N _{общ}	
	т/год	%	т/год	%
Природная	567	61	10 491	70
Антропогенная, в том числе	359	39	4499	30
– от точечных источников	236	25	2673	18
– от рассеянных источников	123	13	1826	12
Общая нагрузка	926	100	14 990	100

водосборах северо-запада России [Кондратьев и др., 2011].

По результатам математического моделирования установлено, что поступление Р_{общ} в бассейн Онежского озера от рассеянных источников составляет 669 т/год, а N_{общ} – 11 981 т/год. Расчет биогенной нагрузки по натурным данным (табл. 15) хорошо согласуется с результатами моделирования, что свидетельствует о достоверности обоих методов оценки.

Сравнение значений диффузной нагрузки с другими составляющими общей нагрузки

Данные по природным и антропогенным биогенным нагрузкам на Онежское озеро представлены в таблице 16.

Природная фосфорная нагрузка составляет 567 т/год, а азотная – 10 491 т/год, или 61 и 70 % от их общей нагрузки соответственно. Общая фосфорная и азотная нагрузки равняются 926 и 14 990 т/год соответственно (некоторое расхождение значений по сравнению с табл. 13 связано с округлением данных). Точечные источники дают в 1,5–1,9 раза больший вклад в общую биогенную нагрузку, чем рассеянные. Полученная картина в распределении различных видов биогенной нагрузки в бассейне Онежского озера является вполне закономерной и отражает хозяйственную деятельность в его бассейне. Более высокая плотность населения в бассейне озера, чем в других районах Карелии, обуславливает значительное поступление сточных вод. Слабое развитие сельского хозяйства приводит к незначительному поступлению БЭ от сельскохозяйственных источников загрязнения. В то же время в бассейне озера получает активное развитие рыбоводство, вследствие чего диффузная нагрузка от этого источника увеличивается. Наглядным примером этого может быть Ладожское озеро, на территории бассейна которого сельское хозяйство развито в большей степени, чем в бассейне Онежского озера, и биогенная нагрузка от сельскохозяйственных объектов доминирует над другими видами антропогенного влияния, причем нагрузка от

форелевых хозяйств превышает нагрузку от точечных источников загрязнения.

Выводы

С использованием натурных данных по химическому составу и объему воды от различных источников формирования гидрохимического режима Онежского озера, а также сведений по количественному выращиванию товарной форели в его бассейне удалось надежно определить биогенную фосфорную и азотную нагрузку на озеро (Р_{общ} – 926 т/год, N_{общ} – 14 990 т/год), включая их отдельные составляющие (речной биогенный сток, поступление веществ с атмосферными осадками, подземными водами, с селитебных территорий, со свалок, рыбоводческих хозяйств, сельско- и лесохозяйственных объектов). Результаты расчета биогенной нагрузки хорошо согласуются с данными математического моделирования.

Антропогенная нагрузка по Р_{общ} составляет 359 т/год, или 39 % от общей нагрузки, и озеро исчерпало свой самоочистительный потенциал по этому элементу. По N_{общ} антропогенная составляющая (4500 т/год) достигла 30 % от общей азотной нагрузки, и она меньше природной ассимиляционной способности озера. Большой вклад в антропогенную биогенную нагрузку на озеро дают точечные источники загрязнения, чем рассеянные, поэтому в первую очередь требуется снижение поступления общего фосфора со сточными водами.

Литература

- Бородулина Г. С. Роль подземного стока в формировании химического состава поверхностных вод Карелии // Труды КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 108–116.
- Бородулина Г. С. Биогенные элементы в подземных водах Карелии и их поступление с подземным стоком в озеро // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: материалы V Всероссийского симпозиума с международным участием (10–14 сентября 2012 г. Петрозаводск, Республика Карелия). Петрозаводск, 2012. С. 254–258.

Иешина А. В., Поленов И. К., Богачев М. А. и др. Ресурсы и геохимия подземных вод Карелии. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1987. 151 с.

Казимиров Н. И., Волков А. Д., Зябченко С. С. и др. Обмен веществ и энергии в сосновых лесах Европейского Севера. Л.: Наука, 1977. 304 с.

Карпечко Ю. В. Гидрологическая оценка антропогенного воздействия на водосборы в таежной зоне Европейского Севера России: автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Петрозаводск, 2004. 49 с.

Китаев С. Н., Ильмаст Н. В., Стерлигова О. П. Методы оценки биогенной нагрузки от форелевых ферм на водные экосистемы. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2006. 38 с.

Кондратьев С. А., Казмина М. В., Шмакова М. В., Маркова Е. Г. Метод расчета биогенной нагрузки на водные объекты // Региональная экология. 2011. № 3–4. С. 50–59.

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

Лозовик П. А., Бородулина Г. С. Соединения азота в поверхностных и подземных водах Карелии // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 6. С. 694–704.

Лозовик П. А. Геохимическая классификация поверхностных вод гумидной зоны на основе их кислотно-основного равновесия // Водные ресурсы. 2013. № 6. С. 583–588.

Лозовик П. А. Оценка состояния и загрязнения водных объектов и нормирование допустимой антропогенной нагрузки на них с учетом процессов, происходящих в водной среде // Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод: материалы научной конференции с международным участием. Ч. 2 (Ростов-на-Дону, 8–10 сентября 2015 г.). Ростов-на-Дону, 2015а. С. 252–256.

Лозовик П. А. Процессы формирования химического состава поверхностных вод гумидной зоны // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: Труды Четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием, Москва, 15–18 сентября 2015 г. М.: ИВП РАН, 2015б. С. 178–181.

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

Онежское озеро. Атлас / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.

Руководство по химическому анализу вод суши. Ч. 1. Ростов-на-Дону: НОК, 2009. 1045 с.

Рыжаков А. В. Кинетические характеристики трансформации азотсодержащих соединений в природной воде // Экологическая химия. 2012. Т. 21, вып. 2. С. 117–124.

Сабылина А. В. Онежское озеро и его притоки // Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. С. 17–40.

Современное состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1992–1997 гг. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1998. 188 с.

Guidelines for the compilation of waterborne pollution to the Baltic Sea (PLC-water). HELCOM Publ. Helsinki, Finland. 2005. 80 p.

HELCOM Baltic Sea Action Plan. Helsinki Commission Publ. Helsinki, 2007. 103 p.

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

Поступила в редакцию 10.02.2016

References

Borodulina G. S. Rol podzemnogo stoka v formirovanihi himicheskogo sostava poverhnostnykh vod Karelii [Role of groundwater flow in formation of the chemical composition of lake water]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN* [Trans. KarRC of RAS]. 2011. No. 4. P. 108–116.

Borodulina G. S. Biogennyye elementy v podzemnykh vodah Karelii i ih postuplenie s podzemnym stokom v ozera [Nutrients in groundwater of Karelia and their runoff into lakes]. *Organicheskoe veshchestvo i biogennyye jelementy vo vnutrennih vodoemah i morskikh vodah: Materialy V Vserossiyskogo simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiem* [Organic matter and biogenic elements in inland waters and marine waters: Proc. 5th all-Russian Symposium with intern. participation]. September 10–14, 2012, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia. Petrozavodsk. 2012. P. 254–258.

Ieshina A. V., Polenov I. K., Bogachev M. A., Terukov V. S. i dr. Resursy i geohimija podzemnykh vod Karelii [Resources and geochemistry of ground waters of Karelia]. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR, 1987. 151 p.

Kazimirov N. I., Volkov A. D., Zjabchenko S. S., Ivanchikov A. A., Morozova R. M. Obmen veshhestv i jenerгии v sosnovykh lesah Evropejskogo Severa [Metabolism and energy exchange in pine forests of the European North]. Leningrad: Nauka, 1977. 304 p.

Karpechko Ju. V. Gidrologicheskaja ocenka antropogennogo vozdejstvija na vodosbory v taezhnoj zone Evropejskogo Severa Rossii [Hydrological assessment of anthropogenic impact on the watersheds in the taiga zone of Russian European North]: Summary of PhD (Dr. of Geogr.) thesis. Petrozavodsk, 2004. 49 p.

Kitaev S. N., Il'mast N. V., Sterligova O. P. Metody ocenki biogennoj nagruzki ot forelevykh ferm na vodnye jekosistemy [Methods for assessing biogenic loads from trout farms on aquatic ecosystems]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2006. 38 p.

Kondratyev S. A., Kazmina M. V., Shmakova M. V., Markova E. G. Metod rascheta biogennoj nagruzki na vodnye objekty [A method for calculation of the nutrient load on water bodies]. *Regional'naya ekologiya* [Regional ecology]. 2011. No. 3–4. P. 50–59.

Lozovik P. A. Gidrogeohimicheskie kriterii sostojanija poverhnostnyh vod gumidnoj zony i ih ustojchivosti k antropogennomu vozdejstvu [Hydrogeochemical criteria of surface water condition in humid areas and their resistance to human impact]: Summary of PhD (Dr. of Chem.) thesis. Moscow, 2006. 56 p.

Lozovik P. A., Borodulina G. S. Soedinenija azota v poverhnostnyh i podzemnyh vodah Karelii [Nitrogen compounds in the surface and subsurface waters of Karelia]. *Vodnye resursy* [Water resources]. 2009. Vol. 36, no. 6. P. 694–704.

Lozovik P. A. Geohimicheskaja klassifikacija poverhnostnyh vod gumidnoj zony na osnove ih kislotno-osnovnogo ravnovesija [Geochemical classification of surface waters in humid zone based on their acid-base equilibrium]. *Vodnye resursy* [Water resources]. 2013. No. 6. P. 583–588.

Lozovik P. A. Ocenka sostojanija i zagrjaznenija vodnyh objektov i normirovanie dopustimoj antropogennoj nagruzki na nih s uchetom processov, proishodjashih v vodnoj sredy [State estimation and pollution of water objects and rationing of permissible anthropogenic load with account of processes happening in aquatic environment]. Materialy nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem "Sovremennye problemy gidrohimii i monitoringa kachestva poverhnostnyh vod" [Proc. sci. conf. with intern. participation "Current problems of hydrochemistry and monitoring of surface water quality"]. Part 2. September 8–10, 2015 in Rostov-on-Don. Rostov-on-Don, 2015a. P. 252–256.

Lozovik P. A. Processy formirovanija himicheskogo sostava poverhnostnyh vod gumidnoj zony [The processes of formation of surface water chemical composition in humid zone]. Fundamentalnye problemy vody i vodnyh resursov [Fundamental problems of water and water resources]: Proc. 4th all-Russian sci. conf. with intern. participation, Moscow, Russia, 15–18 September 2015. Moscow: IWP RAS, 2015b. P. 178–181.

Mezhlaboratornoe slichenie rezultatov analiza organicheskogo veshhestva i biogennyh jelementov v prirodnyh vodah [Interlaboratory comparison of analysis of organic substances and biogenic elements in natural waters]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2015. 66 p.

Onezhskoe ozero. Atlas [Lake Onega. Atlas]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2010. 151 p.

Rukovodstvo po himicheskomu analizu vod sushi [Manual for chemical analysis of land surface waters]. Part 1. Rostov-on-Don: NOK, 2009. 1045 p.

Ryzhakov A. V. Kineticheskie karakteristiki transformacii azotsoderzhashhih soedinenij v prirodnoj vode [Kinetic parameters of the transformation of nitrogen-containing compounds in natural water]. *Ekologicheskaya himiya* [Ecological chemistry]. 2012, Vol. 21, iss. 2. P. 117–124.

Sabylina A. V. Onezhskoe ozero i ego pritoki [Lake Onega and its tributaries]. Sostojanie vodnyh objektov Respubliki Karelija. Po rezultatam monitoringa 1998–2006 gg. [The state of water bodies of the Republic of Karelia based on monitoring results of 1998–2006]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2007. P. 17–40

Sovremennoe sostojanie vodnyh objektov Respubliki Karelija. Po rezultatam monitoringa 1992–1997 gg. [The present-day state of water bodies of the Republic of Karelia according to the results of monitoring of 1992–1997]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 1998. 188 p.

Guidelines for the compilation of waterborne pollution to the Baltic Sea (PLC-water) HELCOM Publ. Helsinki, Finland. 2005. 80 p.

HELCOM Baltic Sea Action Plan. Helsinki Commission Publ. Helsinki, 2007. 103 p.

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

Received February 10, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Лозовик Петр Александрович

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

Бородулина Галина Сергеевна

старший научный сотрудник, к. г.-м. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН,
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: bor6805@yandex.ru
тел.: +79114094171

CONTRIBUTORS:

Lozovik, Petr

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

Borodulina, Galina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: bor6805@yandex.ru
tel.: +79114094171

Карпечко Юрий Васильевич

ведущий научный сотрудник, д. г. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: karp@nwpi. krc.karelia.ru
тел.: (8142) 578569

Кондратьев Сергей Алексеевич

зам. директора по научной работе, д. ф.-м. н.
Институт озераведения РАН
ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105
эл. почта: kondratyev@limno.org.ru
тел.: (812) 3870276

Литвиненко Александр Васильевич

старший научный сотрудник
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: litvinenko@nwpi.krc.karelia.ru
тел.: +79212239383

Литвинова Ирина Абрамовна

инженер-исследователь
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: litvinovoi@rambler.ru
тел.: +79535284996

Karpechko, Yury

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: karp@nwpi.krc.karelia.ru
tel.: (8142) 578569

Kondratyev, Sergey

Institute of limnology, Russian Academy of Sciences
9 Sevastyanov St., 196105 St. Petersburg, Russia
e-mail: kondratyev@limno.org.ru
tel.: (812) 3870276

Litvinenko, Alexander

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: litvinenko@nwpi.krc.karelia.ru
tel.: +79212239383

Litvinova, Irina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: litvinovoi@rambler.ru
tel.: +79535284996

УДК 551.312.48

ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССОВ ИЛОНАКОПЛЕНИЯ В СОБАКИНСКОЙ СИСТЕМЕ ОЗЕР

Д. В. Иванов¹, И. И. Зиганшин¹, Е. В. Осмелкин², Р. Р. Хасанов¹

¹ Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан

² Государственный природный заповедник «Присурский»

Приводятся результаты исследований современного и исторического накопления донных отложений в охраняемых карстовых озерах, расположенных в Зеленодольском районе Республики Татарстан. Установлено, что основные количественные параметры осадкообразования в Собакинских озерах остаются идентичными на протяжении последних 300 лет. Показатели ежегодного накопления взвешенного материала в озерах пропорциональны площади их водного зеркала. Современная скорость илонакопления в озерной системе составляет 1,4 мм/год. Тренд увеличения биогенной нагрузки на озера проявляется в заметном росте содержания органического вещества и соединений азота и фосфора в современных иловых отложениях.

Ключевые слова: донные отложения; илонакопление; биогенные элементы; карстовые озера; Республика Татарстан.

D. V. Ivanov, I. I. Ziganshin, E. V. Osmelkin, R. R. Khasanov. THE CHARACTERISTICS OF SEDIMENTATION PROCESSES IN SOBAKINO LAKES SYSTEM

The results of studies of the superficial and stratified sediments in the protected karst lakes located in the Zelenodolsk District of the Republic of Tatarstan are reported. The studies showed that the key quantitative parameters of sedimentation in the lakes have remained identical in the last 300 years. The indices of annual accumulation of suspended material in the lakes are proportional to their water table area. The current rate of sedimentation in the lake system is 1.4 mm/year. The trend for an increase in the nutrient load on the lakes is manifest in a notable increase in the content of organic matter, nitrogen and phosphorus compounds in superficial sediments.

Keywords: bottom sediments; sedimentation; nutrients; karst lakes; Republic of Tatarstan.

Введение

Одним из факторов деградации озерных экосистем является заиление. В Республике Татарстан (РТ) интенсивное развитие эрозионных процессов в течение последних десятилетий

привело к накоплению в водоемах природных и урбанизированных территорий донных отложений, существенно превышающему фоновые значения, и, как следствие, к выполаживанию подводного рельефа озер и водохранилищ с образованием обширных мелководий

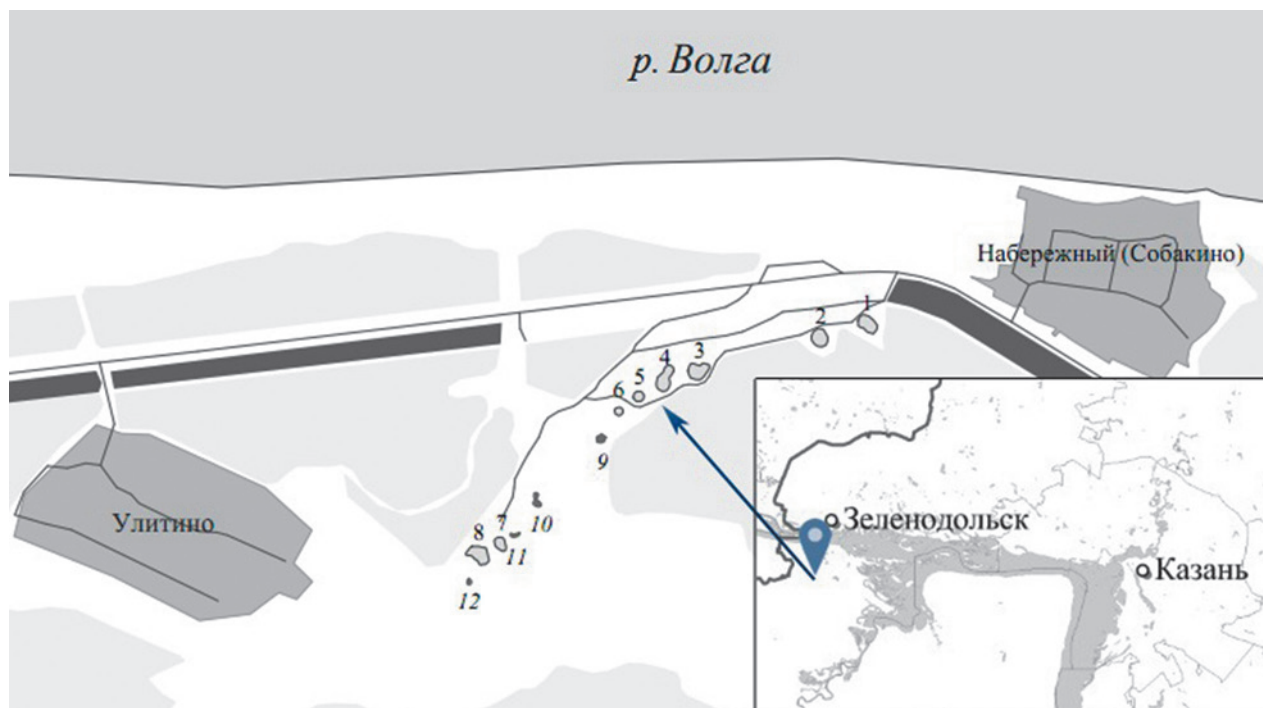


Рис. 1. Система озер Собакино:

1–8 – существующие озера (1 – Собакино, 2 – Провальное), 9–12 – пересохшие озера

и постепенному их зарастанию, а в ряде случаев к полной потере водной поверхности [Озера..., 1976; Можерин, Курбанова, 2004; Тайсин, 2006 и др.]. По землеустроительным планам 1957–1959 гг. на тот период в республике насчитывалось 10833 озера. В «Кадастре озер РТ», составленном в 1969 г., в Татарстане было зафиксировано уже 9762 озера площадью более 0,1 га. К концу XX в. в республике было учтено 8111 озер [Мошкова, 1997]. Таким образом, за 40-летний период на территории РТ исчезло 2722 озера. Вклад заиления как причины исчезновения озер до настоящего времени количественно не оценен, что обуславливает актуальность проведения исследований процессов озерного осадконакопления с учетом большого разнообразия физико-географических условий республики.

В начале XXI в. гидрология озер существенным образом изменилась в результате засухи 2010 г. Ее последствия проявились в снижении уровня озер во многих районах РТ, особенно в тех водоемах, где отсутствует грунтовое питание, а приходную статью водного баланса составляют исключительно атмосферные осадки. На этом фоне весьма значимым фактором деградации озерных экосистем природных и урбанизированных территорий республики явилось прогрессирующее эвтрофирование водных масс под влиянием сельскохозяйственных, коммунальных и промышленных стоков,

ведущее к активному зарастанию образующихся мелководий.

Все эти негативные тенденции затронули и водоемы, уникальные по своему генезису и природным особенностям, включенные в Государственный реестр особо охраняемых природных территорий в РТ [2007]: озера Чистое и Сапуголи Лаишевского района (Предкамье), Чистое, Атаманское и Безымянное Спасского района (Закамье), а также и Собакинскую систему редких для территории РТ провальных карстовых озер, расположенную в Зеленодольском районе республики (Предволжье). В этой связи была поставлена цель данного исследования: оценить современные показатели осадконакопления в озерах системы Собакино, а также выявить основные тренды изменения физико-химических свойств их донных отложений с течением времени.

Характеристика объектов исследования

Система небольших по площади глубоко-водных карстовых озер правильной округлой формы – «Собакинских ям» – вытянулась дугой с юго-запада на северо-восток вдоль правого берега р. Волги между д. Улитино и пос. Набережный (бывший н. п. Собакино) (рис. 1). Два водоема системы – Собакино (1) и Провальное (2) – являются памятниками природы регио-

Таблица 1. Морфометрические показатели озер

Озеро	Площадь, га	Объем, м ³	Глубина, м	
			средняя	максимальная
Собакино	0,21	4000	2,0	3,9
Провальное	0,29	6000	5,0	11,0

нального значения и были выбраны в качестве объектов исследования.

Абсолютные отметки поверхности изменяются здесь в пределах от 53,0 (уровень Куйбышевского водохранилища) до 187,7 м. Урез воды в озерах находится на отметке 79,0 м [Горшкова и др., 2006]. Равнинное плато обрывается к руслу р. Волги крутым уступом, изрезанным оврагами и балками. Густота овражно-балочной сети варьирует в пределах от 0,17 до 2,1 км/км². Значения среднего уклона поверхности колеблются в пределах 0,6°–2,5°, общее направление уклона – с запада на восток. В геологическом строении территории принимают участие пермские (казанский и уржумский ярусы), неогеновые и четвертичные отложения. Карстовые проявления имеют широкое распространение на исследуемой территории в виде сухих воронок и сформированных на них озер. Почвенный покров водоразделов представлен светло-серыми и серыми лесными тяжелосуглинистыми почвами с низким содержанием гумуса (3 %) и слабой устойчивостью к эрозии.

В таблице 1 приведена сводная информация об основных показателях поверхности и ложа озер, основанная на официальных источниках [Государственный реестр..., 2007], фондовых материалах и собственных натурных измерениях. По результатам морфометрической съемки

были составлены батиметрические планы озер (рис. 2). В оз. Собакино выделяются две карстовые воронки: большая из них достигает глубины 3,9 м, меньшая – 2,5 м. Котловина оз. Провальное имеет конусовидную форму и несколько вытянута в северном направлении. Изобата 10 м расположена в центре воронки и имеет около 15 м в длину и 4 м в ширину.

По химическому составу вод исследуемые озера относятся к гидрокарбонатно-кальциевому типу с минерализацией 180–390 мг/л. Степень зарастания прибрежной мелководной зоны оз. Собакино не превышает 5 %. В оз. Провальное из-за резкого падения глубины пояс высшей водной растительности практически отсутствует и представлен отдельными куртинами рогоза узколистного.

Несмотря на статус ООПТ, акватория и прибрежная территория озер используется местным населением в различных хозяйственно-бытовых целях. Но основным негативным антропогенным фактором, влияющим на экосистемы Собакинских озер, является распашка их прибрежной зоны практически под самый урез воды, что существенным образом сказывается на процессах заиления и эвтрофирования. К началу 1960-х годов в системе Собакинских озер насчитывалось 12 водоемов. На сегодняшний день здесь сохранилось восемь озер, остальные водоемы либо заилились, либо утратили

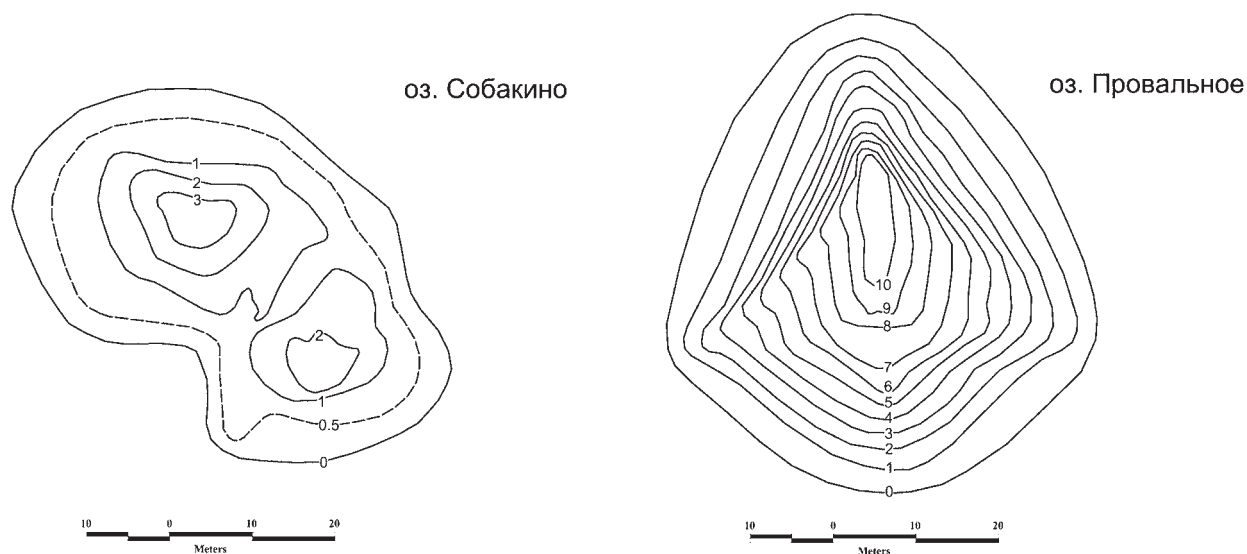


Рис. 2. Батиметрические планы озер

Таблица 2. Показатели илонакопления в озерах по данным седиментационных ловушек и физико-химические свойства наилка

Дата установки	Дата снятия	Масса осадка, г	Илонакопление, в год		рН	ППП, %	N, %	P, %
			г/м²	мм				
Собакино								
31.07.2008	29.07.2009	57,5	650	2,6	6,9	23,58	1,12	0,79
Провальное								
22.03.2007	31.07.2008	16,5	140	0,6	-	44,82	1,28	2,33
31.07.2008	29.07.2009	85,9	970	3,9	6,4	15,19	0,65	0,48
29.07.2009	21.08.2010	17,9	190	0,7	-	43,96	1,66	0,96
21.08.2010	13.07.2011	5,9	73	0,3	-	53,6	2,00	1,56

Примечание. Прочерк означает, что измерения не проводились.

водную поверхность по другим причинам. На их месте остались сухие, не заполненные водой воронки, заросшие растительностью.

Материалы и методы

Исследования процессов осадкообразования в озерах Собакино и Провальное сочетали в себе два взаимодополняющих метода: метод стратификационных исследований колонок донных отложений ненарушенной структуры (историческое осадконакопление) и метод седиментационных ловушек (современное осадконакопление). Для отбора стратиграфических колонок донных отложений использовали трубку ГОИН. Отбор кернов производился в наиболее глубокой части водоемов, где отложения достигают максимальной мощности. С учетом строения озерных котловин можно утверждать, что преобладающая часть поступающего в водоемы взвешенного материала аккумулируется в центральной части формирующих их карстовых воронок. После морфологического описания колонки разделяли на отдельные слои с интервалом 5 см для последующего анализа.

Исследования процессов современного осадконакопления в озерах выполнены в 2007–2011 гг. с использованием седиментационных ловушек, устанавливаемых в профундали озер. За основу конструкции взята разработка литовских исследователей [Тамошайтис, 1975]. Ловушки представляют собой ящик с грузом, внутри которого закреплены стаканы-емкости. Общая площадь поверхности определялась как сумма поверхностей отдельных стаканов.

Сроки установки седиментографов варьировали от 11 до 16 месяцев. После выемки ящиков седиментационный материал из всех емкостей сливался в один сосуд. Суспензию упаривали, сушили, взвешивали, растирали для количественного анализа. Полученные результаты использовали для дальнейших

расчетов поступления вещества (г/м²) и скорости илонакопления (г/(м²·год), мм/год).

В пробах современных и стратифицированных донных отложений определяли объемный вес, гранулометрический состав, величину потерь при прокаливании (ППП) при 500 °С, валовых форм азота и фосфора, реакцию среды [Аринушкина, 1961].

Результаты и их обсуждение

Параметры илонакопления

В таблице 2 в сводном виде отражены результаты определения параметров илонакопления и физико-химических свойств осадков, аккумулированных в профундали озер.

За исследуемый период величина илонакопления в озерах Собакино и Провальное варьировала в довольно широких пределах: от 73 до 970 г/м². Весьма значительный разброс показателей в первую очередь может быть обусловлен изменчивостью количества атмосферных осадков, выпавших на водосбор озер за указанный период и определяющих интенсивность поверхностного стока взвешенных веществ. Такая зависимость действительно существует, однако она не в полной мере объясняет полученные нами данные (рис. 3). В частности, из указанной закономерности «выбивается» период 2008–2009 гг., когда при относительно небольшом суммарном количестве осадков 530 мм (при среднемноголетнем значении 477 мм) илонакопление в обоих озерах достигало максимума за период наблюдений. Вместе с тем с сентября по ноябрь 2008 г. на водосборе озер выпало 150–180 % среднегодовой нормы осадков, что, вероятно, и сыграло решающую роль в показателях эрозионного смыва почв. Иными словами, аномальное в определенном смысле осадконакопление в озерах Собакино и Провальное с июля 2008 г. по

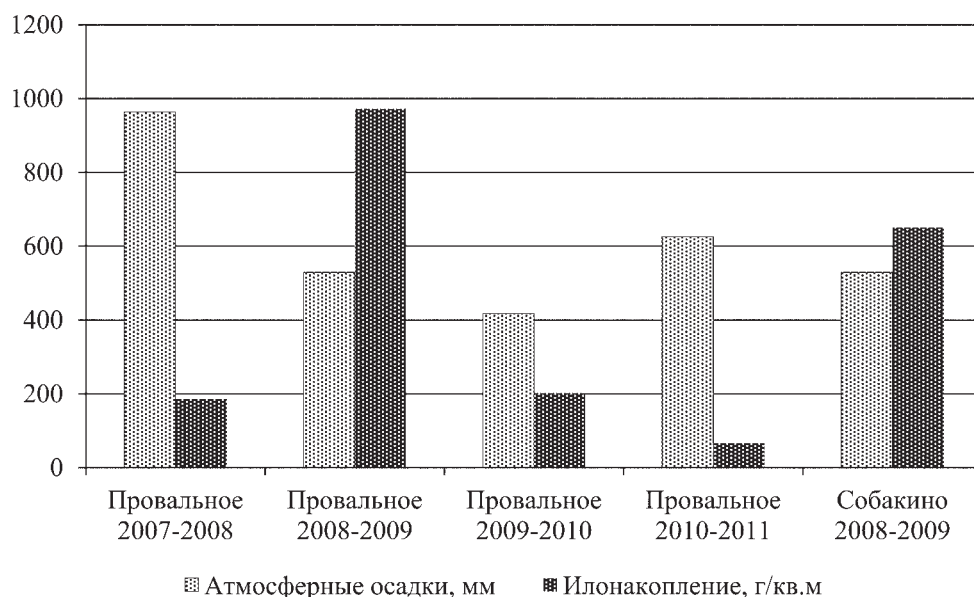


Рис. 3. Взаимосвязь количества атмосферных осадков (метеостанция Вязовые) и скорости илонакопления в озерах

июль 2009 г. в значительной мере обусловлено массой взвешенного вещества, поступившего в озера всего лишь за три осенних месяца 2008 г.

Если сравнить данные по илонакоплению в озерах Собакино и Провальное, полученные за один и тот же период (2008–2009 гг.), что представляется нам наиболее корректным, то окажется, что при равной площади отбора (0,0883 м²) вес осадков и величина поступления на единицу площади дна озер заметно отличаются (табл. 2). Эти различия объясняются морфометрическими параметрами водоемов. Форма и глубина котловины оз. Провальное способствуют сносу взвешенного материала с бортов карстовой воронки в ее центр. В оз. Собакино выражены два воронкообразных карстовых понижения, в связи с чем выпадение взвесей из столба воды и аккумуляция осадка на дне водоема происходит пропорционально площади воронок. Важно и то, что Провальное имеет большую площадь водного зеркала по сравнению с Собакино (табл. 1). Соотношение площадей озер равно 1,4; почти столько же составляет и отношение годового поступления вещества – 1,5. Таким образом, масса ежегодно откладываемого в озерах осадка пропорциональна площади их водного зеркала.

Средняя скорость илонакопления в оз. Провальное за период наблюдений составила 343 г/(м²·год), или 1,4 мм/год. Принимая во внимание установленные нами выше взаимосвязи осадконакопления и морфометрических параметров озер, современную скорость накопления донных отложений во всей системе

Собакинских озер можно ориентировочно оценить величиной 1,4 мм/год, что в 3,6 раза ниже, чем в озерах региона [Иванов и др., 2011]. По сути, это означает, что на сегодняшний день заиление не представляет собой существенной опасности как фактор деградации исследуемой озерной системы.

Чтобы выяснить изменения параметров илонакопления в озерах системы во времени, обратимся к результатам стратиграфических исследований кернов донных отложений. Керна отложений озер Провальное и Собакино имели равную мощность – 45 см. При этом морфологически они заметно отличались. Если в оз. Собакино колонка была однородного серого цвета и слабо дифференцирована по глубине, то в оз. Провальное четко выделялся верхний темноокрашенный слой мощностью около 10 см, постепенно сменявшийся серым, а затем буровато-серым илом со слабым зеленоватым оттенком. Более темная окраска, обусловленная, как правило, накоплением автохтонного органического вещества на фоне замедленных процессов минерализации в условиях дефицита кислорода, указывает на рост биологической продуктивности оз. Провальное за последние десятилетия. Наиболее вероятно, что в оз. Собакино основной вклад в формирование режима взвешенных веществ вносят аллохтонные взвеси.

Маркерные слои в обеих колонках отсутствовали, при морфологическом описании отложений слоистость илов не проявилась. В этой связи определение абсолютного возраста вскрытых донных отложений пока не представлялось

возможным. Если предположить, что скорость илонакопления ($\sim 1,4$ мм/год) была стабильной на протяжении достаточно длительного времени, то эти отложения характеризуют более чем 300-летний период эволюции озер.

Физико-химические свойства отложений

При интерпретации данных гранулометрического анализа донных отложений, как и при оценке скорости илонакопления, следует принимать во внимание динамику климатических показателей анализируемого периода, в частности, среднегодовое количество осадков, определяющее интенсивность поверхностного стока и эффективный диаметр транспортируемых частиц, образующих годовой наилок. Биогенный фактор влияет на изменение доли мелких частиц в отложениях за счет автохтонной составляющей, формируемой в водоемах в результате седиментации мертвого органического вещества. По гранулометрическому составу современные осадки озер отличаются: в Собакино это песчанистые илы, в Провальном – серые глинистые илы (табл. 2). При рассмотрении послойного изменения содержания тонкодисперсных фракций в колонках отложений заметно, что доля пелитовых частиц ($< 0,01$ мм)

в оз. Провальное постоянно находилась на 10–30 % выше, чем в оз. Собакино (рис. 4).

Так же синхронно, как и послойное изменение гранулометрии осадков, выглядит временная динамика в колонках отложений объемного веса (рис. 4). С поверхности до глубины 30 см происходит постепенное уплотнение осадка с 0,55 до 0,95 г/см³, затем наблюдается обратная тенденция. Различия в плотности структуры или скелета соответствующих слоев донных отложений двух озер, как следует из сравнения представленных графиков, обусловлены изменением отношения глинистой и песчаной фракций в многолетнем аспекте.

Реакция среды наилка, отобранного из седиментографов (табл. 2), так же как и стратифицированных отложений в колонках, была близкой к нейтральной ($pH = 6,4–7,1$). Карстовые провалы, на которых и возникли Собакинские озера, приурочены к отложениям казанского яруса пермской системы, содержащим в своем составе известняки, доломиты и гипс. Донные отложения озер, водная масса которых пополняется за счет подпитки подземными водами, насыщены соединениями кальция и магния, в определенной мере нейтрализующими кислые продукты разложения органического вещества, аккумулирующиеся на дне водоемов.

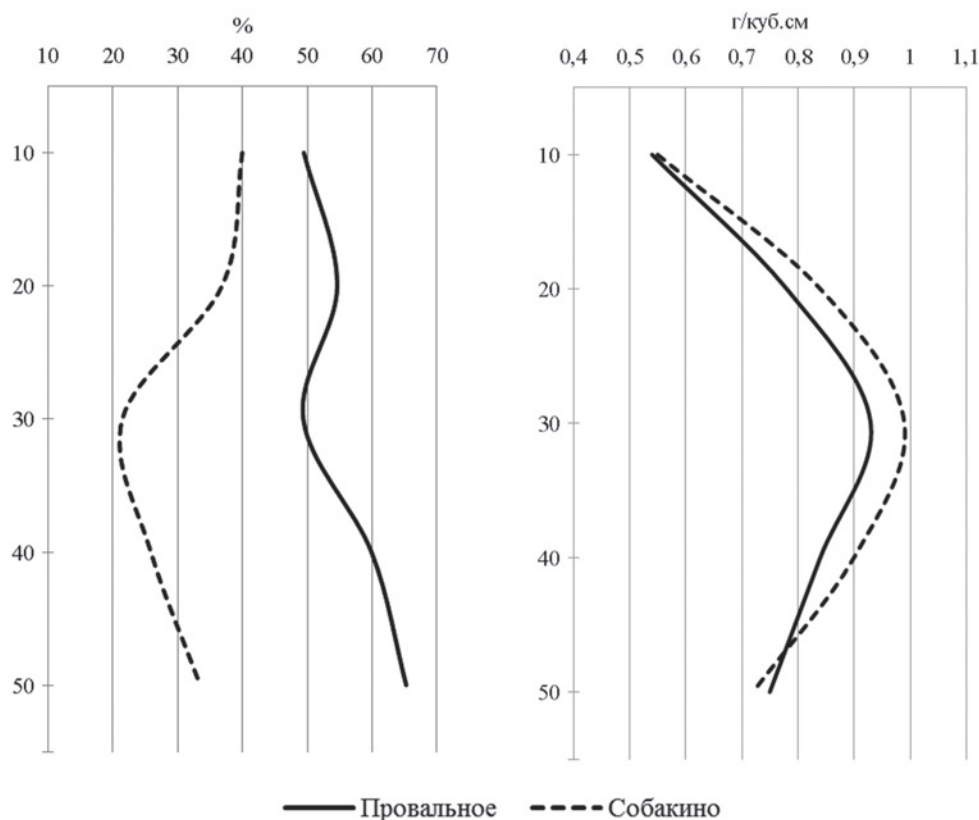


Рис. 4. Изменение содержания пелитовых частиц (слева) и объемного веса (справа) в колонках отложений озер

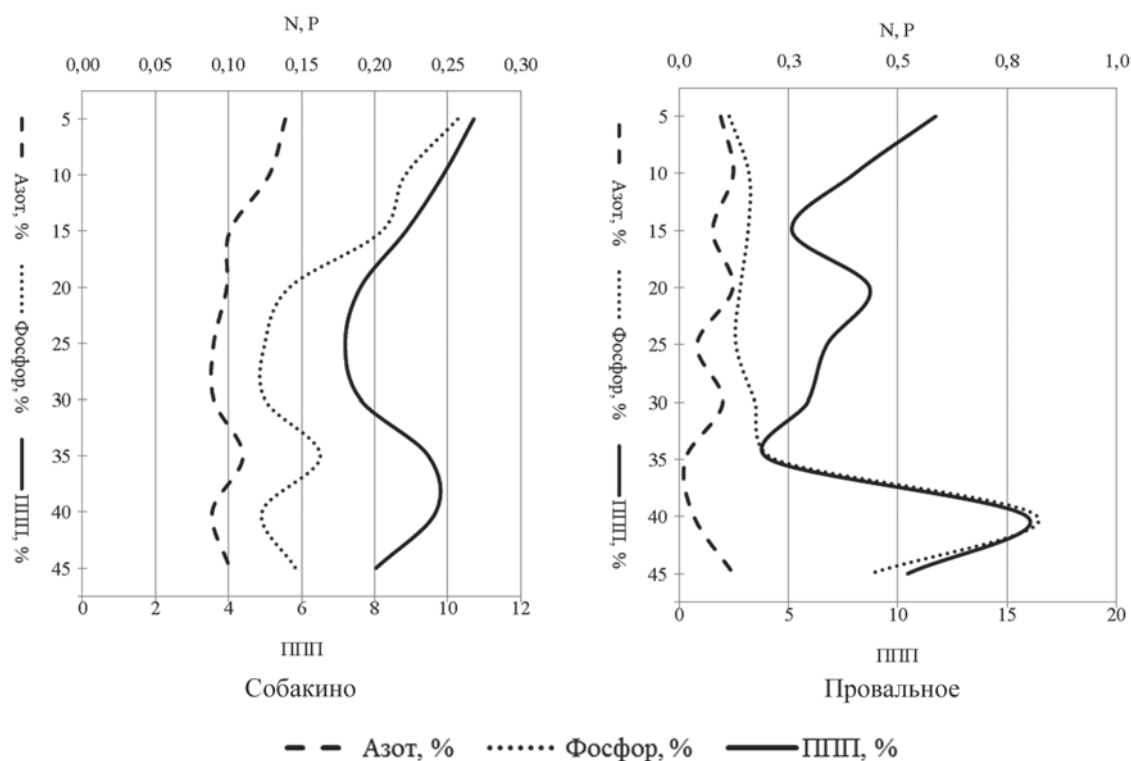


Рис. 5. Изменение содержания органического вещества (ППП), азота и фосфора в колонках донных отложений озер

Величина потерь при прокаливании, которая косвенно характеризует содержание органического вещества в донных отложениях, варьирует от 7 до 15 % и позволяет отнести их к типу минеральных осадков. Как уже отмечалось, распределение органического вещества и биогенных элементов в колонках отложений хорошо отражают изменения биопродукционных условий в Собакинских озерах во времени. В оз. Собакино отмечается рост содержания органики, азота и фосфора в поверхностных слоях (рис. 5). Об этом же говорят и данные седиментационных ловушек, где величина потерь при прокаливании достигает 54 % (табл. 2). Подобного рода динамика указывает на изменение трофности водоема под влиянием биогенных стоков из сопряженных аграрных ландшафтов, вызывающих увеличение продуктивности фитопланктона как основного поставщика биогенных взвесей. При сопряженном анализе данных о содержании органического вещества в осадке из седиментографов и величинах его поступления хорошо выявляется соотношение основных источников поступления в исследуемые озера взвешенного материала – аллохтонного и автохтонного. Чем больше масса осадка, тем ниже в нем величина потери при прокаливании (т. е. доля органического материала) и, напротив, выше вероятность его аллохтонного поступления (табл. 2). В оз. Провальное

был замечен рост органического вещества в слое 0–10 см: в сравнении с более глубокими слоями отложений его аккумуляция усилилась почти в два раза (рис. 5). Режим поступления в донные отложения этого озера соединений фосфора, начиная с глубины 35 см, носил стабильный характер, указывая на неизменность величины внешней фосфорной нагрузки.

По данным седиментационных ловушек, содержание валового азота и валового фосфора в наилке оценивается как очень высокое (табл. 2). Оно существенно превышает содержание этих элементов в слое 0–5 см колонок отложений соответствующих озер. Здесь логично будет предположить, что по мере «старения» наилка происходит окисление и минерализация содержащегося в его составе органического вещества, а также превращение соединений азота и фосфора. Азот в основном в виде аммония и нитратов, а фосфор в виде фосфатов переходят сначала в придонные горизонты, а в результате перемешивания водных масс – в фотические слои озер, вовлекаясь в новые биологические циклы. Вследствие этого содержание их в поверхностных илах со временем будет снижаться и постепенно приблизится к уровню, ныне наблюдаемому в стратифицированных отложениях. Расчеты показали, что биогеноудерживающая способность донных отложений в озерах Собакино и Провальное

низкая и составляет по азоту около 0,1, по фосфору – 0,2. Это означает, что интенсивность перехода из донных отложений обратно в воду соединений азота в два раза выше, чем фосфора. Последний достаточно прочно аккумулируется в составе донных отложений Собакинских озер, что составляет один из известных эффективных механизмов самоочищения водных экосистем от минеральных форм фосфора.

Заключение

Результаты исследования показали, что, несмотря на морфологические (качественные) различия вертикальной структуры донных отложений, основные количественные параметры их накопления в озерах Провальное и Собакино в целом остаются идентичными на протяжении последних 300 лет. Показатели ежегодного накопления осадочного материала в исследуемой системе озер прямо пропорциональны площади их водного зеркала. Современная скорость аккумуляции тонкодисперсных отложений в профундали озер Собакино оценивается в среднем величиной 1,4 мм/год. В этой связи опасность деградации этих водных объектов, включенных в региональную систему особо охраняемых природных территорий, в результате заиления пренебрежимо мала.

Близкий характер изменений основных физических и химических свойств стратифицированных иловых отложений озер Собакино и Провальное доказывает общность условий поступления и седиментации вещества в этих генетически близких водоемах, интегрирующих все многообразие действующих на исследуемой территории внешних и внутренних факторов среды, включая ландшафтные

и гидрологические особенности водосборного бассейна. Наличие тренда увеличения биогенной нагрузки на озера наиболее заметно проявляется в современных отложениях оз. Собакино.

Литература

Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1961. 490 с.

Государственный реестр особо охраняемых природных территорий в Республике Татарстан. Изд. второе. Казань: Идел-Пресс, 2007. 408 с.

Горшкова А. Т., Низамова Л. З., Антипова И. В. и др. Собакинские озера – уникальные водные объекты Республики Татарстан // Эколого-гидрологические проблемы изучения и использования водных ресурсов: Сборник научных трудов. Казань: Идел-Пресс, 2006. С. 113–116.

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

Мозжерин В. И., Курбанова С. Г. Деятельность человека и эрозионно-русловые системы Среднего Поволжья. Казань: Арт-Дизайн, 2004. 128 с.

Мошкова Л. В. Озерность Республики Татарстан по анализу картографического материала // Актуальные экологические проблемы Республики Татарстан: материалы III респ. конф. Казань, 1997. 38 с.

Озера Среднего Поволжья. Л.: Наука, 1976. 236 с.

Тайсин А. С. Озера Приказанского района, их современные природные и антропогенные изменения. Казань: ТГГПУ, 2006. 167 с.

Тамошайтис Ю. С. Влияние физико-географических условий водосборных бассейнов на осадконакопление в малых озерах // Накопление веществ в малых озерах юго-восточной Литвы. Вильнюс, 1975. С. 381–405.

Поступила в редакцию 11.03.2016

References

Arinushkina E. V. Rukovodstvo po himicheskomu analizu pochv [Guide to the chemical analysis of the soils]. Moscow: MGU, 1961. 490 p.

Gosudarstvennyj reestr osobo ohranjaemyh prirodnih territorij v Respublike Tatarstan [State register of specially protected natural areas in the Republic of Tatarstan]. Izd. vtroe. Kazan: Idel-Press, 2007. 408 p.

Gorshkova A. T., Nizamova L. Z., Antipova I. V., Ivanov D. V., Meshhanova N. L., Ziganshin I. I. Sobakinskie ozera unikal'nye vodnye ob'ekty Respubliki Tatarstan [Sobakinsky lakes unique water objects of the Republic of Tatarstan]. Jekologo-gidrologicheskie problemy izuchenija i ispol'zovanija vodnyh resursov [Ecological-hydrological problems of studying and use of water resources]. Kazan: Idel-Press, 2006. P. 113–116.

Ivanov D. V., Ziganshin I. I., Osmelkin E. V. Ocenka skorosti osadkonakoplenija v ozerah Kazani i Prikazan'ja [Sedimentation rates evaluation of some lakes in Kazan and Prikazansky region]. Georesursy [Georesources]. 2011. No. 2 (38). P. 46–48.

Mozzherin V. I., Kurbanova S. G. Dejatel'nost' cheloveka i jerozionno-ruslovyje sistemy Srednego Povolz'hja [Human activity and erosion of river bed systems of the Middle Volga]. Kazan: Art-Dizajn, 2004. 128 p.

Moshkova L. V. Ozernost' Respubliki Tatarstan po analizu kartograficheskogo materiala [Lake percentage of the Republic of Tatarstan according to the analysis of cartographic materials]. Aktual'nye jekologicheskie problemy Respubliki Tatarstan [Actual environmental

problems of the Republic of Tatarstan]: Abstract III rep. conf. (Kazan, 1997). Kazan, 1997. 38 p.

Ozera Srednego Povolzh'ja [Lakes of the Middle Volga]. Leningrad: Science, 1976. 236 p.

Tajsin A. S. Ozera Prikazanskogo rajona, ih sovremennye prirodnye i antropogennye izmeneniya [Lakes of the Prikazansky area, their modern natural and anthropogenic changes]. Kazan: Publishing house of TGGPU, 2006. 167 p.

Tamoshajtis Ju. S. Vlijanie fiziko-geograficheskikh uslovij vodosbornyh bassejnov na osadkonakoplenie v malyh ozerah [The effect of physico-geographical conditions of catchment basins on sedimentation in small lakes]. *Nakoplenie veshhestv v malyh ozerah jugovostochnoj Litvy* [Accumulation of substances in small lakes of Southeast Lithuania]. Vilnius, 1975. P. 381–405.

Received March 11, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Иванов Дмитрий Владимирович

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

Зиганшин Ирек Ильгизарович

старший научный сотрудник, к. г. н., доцент
Институт проблем экологии и недропользования
Академии наук Республики Татарстан
ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан,
Россия, 420087
эл. почта: Irek.Ziganshin@tatar.ru
тел.: (843) 2759573

Осмелкин Евгений Витальевич

директор
Государственный природный заповедник «Присурский»
пос. Лесной, 9, Чебоксары,
Чувашская Республика, Россия, 428034
эл. почта: pisurskij@mail.ru
тел.: (8352) 414849

Хасанов Рустам Равилевич

младший научный сотрудник
Институт проблем экологии и недропользования
Академии наук Республики Татарстан
ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан,
Россия, 420087
эл. почта: rustamkhasanov88@gmail.com
тел.: (843) 2759573

CONTRIBUTORS:

Ivanov, Dmitry

Institute for Environmental Problems and Subsoil Use,
Tatarstan Academy of Sciences
28 Daur'skaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan,
Russia
e-mail: water-rf@mail.ru
tel.: (843) 2759573

Ziganshin, Irek

Institute for Environmental Problems and Subsoil Use,
Tatarstan Academy of Sciences
28 Daur'skaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan,
Russia
e-mail: Irek.Ziganshin@tatar.ru
tel.: (843) 2759573

Osmelkin, Evgeny

State nature reserve «Prisursky»
9 Forest settlement, 428034 Cheboksary,
Chuvash Republic, Russia
e-mail: pisurskij@mail.ru
tel.: (8352) 414849

Khasanov, Rustam

Institute for Environmental Problems and Subsoil Use,
Tatarstan Academy of Sciences
28 Daur'skaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan,
Russia
e-mail: rustamkhasanov88@gmail.com
tel.: (843) 2759573

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 621.396.96:556.55 (470.22)

ВОЗМОЖНОСТИ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ОЗЕРАХ КАРЕЛИИ

**А. В. Старовойтов¹, М. Ю. Токарев^{1,2}, А. Л. Марченко¹,
Д. А. Субетто³, А. Е. Рыбалко^{2,4}, М. И. Алешин¹**

¹ Геологический факультет Московского государственного университета
им. М. В. Ломоносова

² Центр анализа сейсмических данных Московского государственного университета
им. М. В. Ломоносова

³ Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

⁴ Институт наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета

Обобщены материалы георадиолокационных наблюдений, проведенных на трех озерах в Карелии – Верхнем (ББС МГУ), Нижнем Нильмозере и Вендюрском. Использовалась экранированная антенна 300 МГц. Анализировались возможности георадиолокации, такие как глубинность исследований по воде и по грунту. На каждом озере проводились измерения удельного электрического сопротивления (УЭС) воды и рассматривались основные особенности строения разрезов четвертичных отложений как основных факторов, влияющих на глубинность исследований. Показано, что высокие значения УЭС воды и, вероятно, отсутствие глин в разрезе свидетельствуют об эффективности метода георадиолокации при работах до глубин 10–15 м ниже поверхности дна и при глубине воды до 12–15 м. Георадиолокация, как значительно более дешевый метод по сравнению с сейсмоакустикой, может быть использована при решении многих производственных и научных задач.

К л ю ч е в ы е с л о в а: георадиолокация; озера; четвертичные отложения.

**A. V. Starovoytov, M. Yu. Tokarev, A. L. Marchenko, D. A. Subetto,
A. E. Rybalko, M. I. Aleshin. GPR POTENTIAL WHEN INVESTIGATING
QUATERNARY DEPOSITS IN LAKES OF KARELIA**

The results of the GPR observations carried out in three lakes of Karelia: Lake Verkhneye (the White Sea Biological Research Station of the Moscow State University), Nizhneye Nilmozero and Vendyurskoye, were summarized. A screened 300MHz antenna was used for the survey. The GPR potential, including parameters such as propagation distance in water and in soil, was analyzed. Water resistivity measurements were carried out for

each lake. Characteristics of the Quaternary profile (being the main factor that influence the propagation depth of electromagnetic waves) were studied. It was demonstrated that high water resistivity and, possibly, the lack of clay in the profile suggest GPR can perform well for the depth range of 10–15 m below the bottom and at water depths up to 12–15 m. The GPR method, which is far more cost efficient compared to seismoacoustics, can be applied to deals with many production as well as scientific problems.

Key words: Ground Penetrating Radar; lakes; Quaternary sediments.

Введение

Изучение строения верхней части разреза на пресноводных акваториях проводится для решения разнообразных задач: поиск объектов (например, трубопроводов различного назначения, электрических кабелей и т. д.); изучение геологического строения для строительства мостовых переходов, причалов и других сооружений; экологических исследований (определение распространения и мощности современных загрязненных осадков на водоемах с целью разработки мер по их очистке и реабилитации, что особенно важно, если водоем находится в пределах населенных пунктов); изучение рельефа кровли коренных пород при поисках россыпных месторождений и т. д. До недавнего времени для решения этих задач применялся практически только один метод – метод непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСП) с различными типами источников. Однако его использование в некоторых случаях либо малоэффективно, либо невозможно. Основные причины этого следующие:

1. При работе на малых глубинах возникает интенсивный фон волн-помех (кратных и неполнократных в водном слое), что сильно затрудняет интерпретацию.
2. На пресноводных водоемах в разрезе довольно часто имеются газонасыщенные осадки, которые при работе на высоких частотах (сотни и тысячи Гц) иногда практически полностью «экранируют» залегающие ниже части разреза, что делает применение сейсмоакустики невозможным.
3. Технологически метод НСП намного более сложен по сравнению с георадиолокацией. Для проведения сейсмоакустических исследований необходимо плавсредство с электропитанием, которое не всегда имеется на изучаемой акватории.
4. Работа может проводиться, только когда нет ледяного покрова.

Метод георадиолокационного профилирования, который интенсивно развивается в последнее время, при работе на небольших глубинах в пресных водоемах (до 15–20 метров) обладает рядом преимуществ. Волны-помехи

также имеются, однако благодаря намного меньшей длительности импульса их влияние не столь критично. Наблюдения можно проводить при глубине воды даже около 0,5 метра. Газонасыщенные осадки не влияют на глубинность исследований. Георадиолокационное профилирование можно проводить с небольших резиновых лодок, а в зимнее время – со льда. Вместе с тем есть два основных фактора, которые могут существенно уменьшать глубинность георадиолокационных наблюдений – наличие слоя глин в разрезе и низкое удельное электрическое сопротивление (УЭС) воды. Опыт показывает, что и первый и второй фактор могут быть причиной резкого уменьшения глубинности исследований, вплоть до нуля. Различные аспекты перечисленных выше проблем при проведении георадиолокационных наблюдений рассмотрены в ряде работ [Delaney et al., 1992; Mellett, 1995; Moorman, Michel, 1997; Schwamborn et al., 2002; Fuchs et al., 2004; Arcone et al., 2006, 2010; Владов, Пятилова, 2009; Sambuelli, Bava, 2012; Chanu et al., 2014]. Сопоставление сейсмоакустического и георадиолокационного методов рассмотрено также в работе [Владов и др., 2007; Старовойтов, 2008].

Имеются примеры георадарных наблюдений в областях развития ледниковых отложений [Ulriksen, 1982; Jol et al., 1996]. Получаемые данные позволяют проводить и детальный фациальный анализ в верхней части разреза четвертичных отложений [Smith, Jol, 1997; van Overmeeren, 1998; Libohova et al., 2014]. При использовании низкочастотных антенн в наблюдениях с поверхности георадиолокационные исследования проводятся на глубинах воды до 20–25 метров [Delaney et al., 1992; Bradford, Brosten, 2007].

В Карелии, где озер, различных по площади и глубине, более 61 000, широко развиты различные по вещественному составу ледниковые отложения, часть которых представлена в том числе и глинистыми моренами [Озера..., 1959; Рыжков, 1999]. Очевидно, что на дне озер также могут залегать эти отложения. Наибольшие глубины в озерах (без Ладожского и Онежского) колеблются от 2 до 97 м (например, Сегозеро – 97 м, Топозеро – 56 м, Янисъярви – 57 м и др.).



Рис. 1. Схема расположения районов исследований (показаны белыми стрелками):

1 – оз. Верхнее (ББС МГУ); 2 – оз. Нижнее Нильмозеро; 3 – оз. Вендюрское

Средняя максимальная глубина их составляет 21,3 м. Средние глубины, вычисленные на основании многочисленных промеров в каждом озере, колеблются в пределах от 1 до 23 м. По предварительным данным, большую часть дна озер покрывают илистые грунты. В глубоких крупных и средних озерах Карелии они представлены обычно мягкими илами серого, серо-зеленого и оливкового цветов. Иногда эти илы содержат до 90 % минеральных частиц, чем сильно отличаются от илов озер Русской равнины, в которых содержание органических веществ значительно больше. Илистые грунты распространены преимущественно в профундали озер и частично в литоральной зоне. Они покрывают до 60–80 % площади дна. В прибрежной литоральной зоне грунты иные. Они

образуются в основном вследствие разрушения берегов. Большое распространение в прибрежной зоне имеют каменистые, каменисто-песчаные, галечные, песчано-галечные и песчаные грунты. Они занимают до 10–20 % площади дна. В прибрежной зоне, так же как и в профундали, встречаются глинистые грунты.

Целью опытно-методических георадиолокационных работ на озерах Карелии являлось выяснение возможностей данного метода при изучении рельефа дна и строения четвертичных отложений – определение УЭС воды, глубинности по воде и по грунту. Исследования проводились на трех озерах – озере Верхнем (Беломорская биологическая станция МГУ, расположенная к юго-востоку от д. Пояконда), озере Нижнее Нильмозеро (у д. Нильма,



Рис. 2. Пример работы методом георадиолокации на пресноводных акваториях (оз. Верхнее, ББС МГУ)

пролив Великая Салма Кандалакшского залива) и Вендюрском озере (120 км на северо-запад от г. Петрозаводска) (рис. 1).

Аппаратура и методика работ

На всех озерах георадиолокационные опытно-методические исследования выполнялись с помощью георадара серии «Зонд 12е» производства фирмы Radar Inc., г. Рига. Использовалась экранированная антенна 300 МГц. Работы проводились с резиновой лодки, привязка осуществлялась с помощью GPS (рис. 2). При благоприятном строении разреза данная антенна позволяет изучать разрез на суше до глубины в 10–12 метров с разрешением по вертикали в первые десятки сантиметров. Обработка данных выполнялась в программах RadExPlover и RadExPro производства ООО «Деко-геофизика СК». Интерпретация проводилась в соответствии с методикой, разработанной для анализа сейсмических данных и получившей название «сейсмическая стратиграфия» [Сейсмическая стратиграфия..., 1982; Старовойтов, 2008]. Для оценки удельного электрического сопротивления (УЭС) воды использовался прибор Water Quality Tester (Korea).

Обсуждение результатов

Озеро Верхнее. Расположено на полуострове Киндо в Кандалакшском заливе Белого

моря на высоте около 90 метров н. у. м. рядом с ББС МГУ (рис. 1). Максимальная глубина воды составляет 2,8 м. Измеренное удельное электрическое сопротивление воды – около 360 Омм. Было выполнено 9 профилей с использованием резиновой лодки (рис. 2). Мощность изученного осадочного разреза достигает 340 нс двойного времени. Для пересчета из временного в глубинный масштаб была проведена оценка скорости распространения электромагнитных волн по гиперболам дифрагированных волн, которые встречаются практически по всему разрезу. Образование гипербола, скорее всего, связано с присутствием в отложениях озера стволов деревьев. Анализ скоростей показал, что их значения существенно меняются даже в самой верхней придонной части разреза как по латерали, так и по разрезу от 3,8 до 6,0 см/нс. Такой разброс значений скоростей в осадках, которые по типу волновой картины мало различаются, по-видимому, можно объяснить тем, что профили пересекают эти линейные объекты под разными углами; это приводит к существенному разбросу значений скоростей и, соответственно, к различным значениям мощности отложений [Владов и др., 2010]. Пробы с поверхности дна показали, что по крайней мере придонная часть разреза сложена сапропелем жидкой консистенции. Учитывая эти факторы и опыт аналогичных работ на других акваториях, для оценки мощности

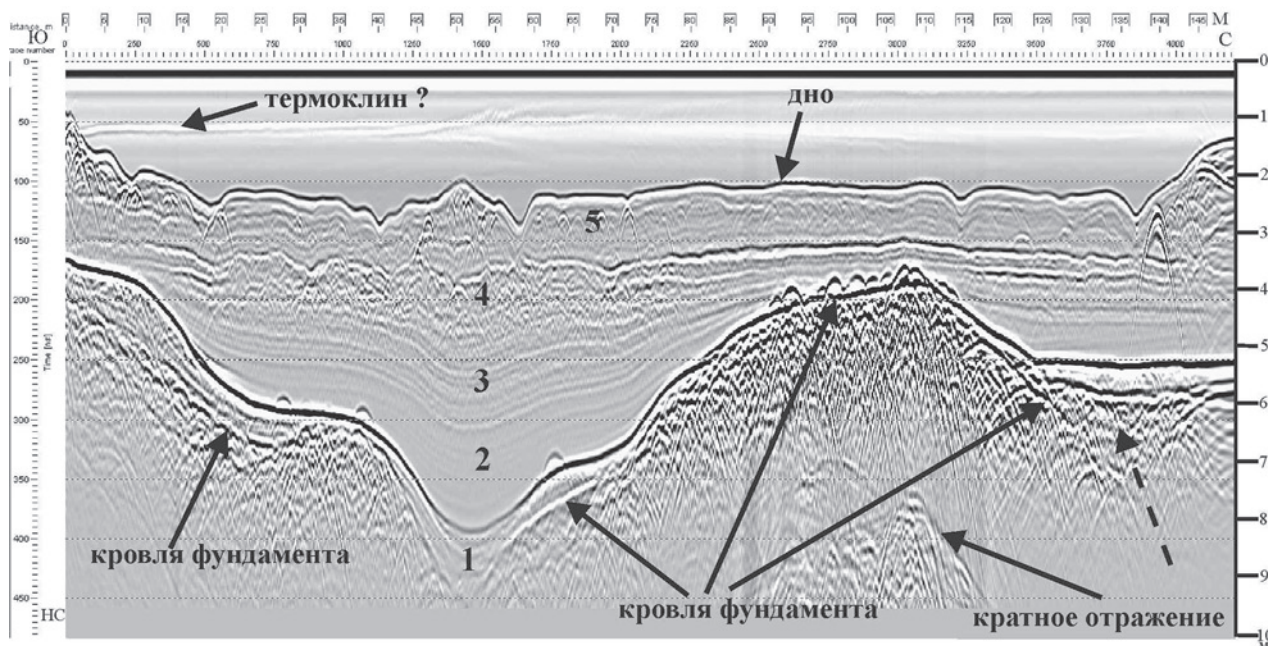


Рис. 3. Георадиолокационный профиль, выполненный на озере Верхнем. Цифрами обозначены комплексы отложений. Пунктирная стрелка показывает предположительно флювиогляциальные отложения, выполняющие долину. Использовалась экранированная антенна 300 МГц

осадочного разреза была использована средняя скорость распространения электромагнитных волн 4,7 см/нс, что позволило оценить максимальную мощность осадочного разреза приблизительно в 8 м (рис. 3).

Анализ волновой картины по всем профилям показал, что весь изученный разрез состоит из двух основных частей (двух комплексов отложений). Нижняя часть разреза выделяется на всех профилях и имеет хаотическую волновую картину без протяженных осей синфазности. Кровля этого комплекса неровная и выделяется на георадиолокационных профилях по многочисленным гиперболам. Основываясь на профилях, выполненных по суше, этот тип волновой картины типичен для пород фундамента, представленных в этом районе беломорскими гнейсами [Хаин, 1977; Слабунов, 2008]. Для подтверждения этого один из аквальных профилей был достроен профилем по суше до выходов коренных пород фундамента на поверхность (рис. 4). В кровле фундамента в пределах озера выделяется поднятие с максимальной высотой около 5 м; оно делит его на две котловины, в которых мощности осадочного выполнения существенно различаются (рис. 3).

Выше над породами фундамента залегают отложения, характеризующиеся в основном слоистым типом волновой картины (рис. 3). В этой толще выделяются пять осадочных комплексов, которые разделяются либо высокоамплитудными осями синфазности (между комплексами

1 и 2, 4 и 5), либо по смене типа волновой картины (между комплексами 2 и 3, 3 и 4). Осадочные комплексы 1–2 выделены в основном в двух понижениях в кровле фундамента, комплекс 3 либо также встречается в понижениях кровли, либо резко уменьшается в мощности над поднятием, разделяющим эти понижения. Комплексы 4 и 5 распространены в пределах всего озера. По результатам георадиолокационной съемки было установлено, что средняя глубина озера составляет около 1,5 м, максимальная – 2,8 м. Волновая картина в осадочном разрезе представлена преимущественно двумя основными типами – слоистым (комплексы 1–3) и хаотическим (южная часть комплекса 4 и небольшие участки в комплексе 5). Для оценки вещественного состава, кроме опробования с поверхности дна, на нескольких участках были рассчитаны коэффициенты отражения от дна и от границы между комплексами 4 и 5, которые составили 0,1 и 0,13 соответственно. Коэффициенты отражения рассчитывались по формуле

$$K_{\text{отр.}} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}},$$

где ϵ_1 и ϵ_2 – диэлектрическая проницаемость в слоях соответственно над и под отражающей границей. Диэлектрическая проницаемость определялась как

$$\epsilon = (C/V)^2,$$

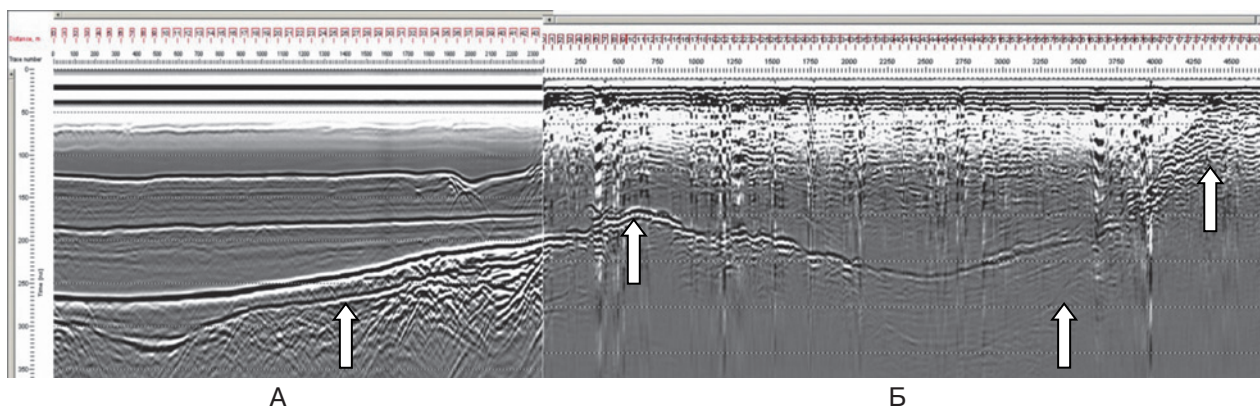


Рис. 4. Георадиолокационный профиль через аквальную часть (А) и его продолжение по суше (Б). Белыми стрелками показана кровля фундамента. Развертка (вертикальная шкала) – 350 нс, длина профиля – 117 м

где C – скорость электромагнитных волн в воздухе, V – скорость в слое [Владов, Старовойтов, 2005; Schmitt et al., 2012]. Эти значения характерны для водонасыщенных практически нелитифицированных грунтов текучей консистенции. В целом рассмотренный слоистый разрез сложен, по-видимому, озерными отложениями (сапропелем, мягкими илами). Участкам разреза с хаотическим типом волновой картины, вероятно, соответствуют осадки с значительным содержанием растительного детрита (торф?). Признаком наличия ледниковых отложений в осадочном чехле оз. Верхнее не обнаружено. Многочисленные «усы» дифракции обусловлены, по-видимому, присутствием в разрезе стволов затонувших деревьев и отдельных валунов. Максимальная глубинность георадиолокационных исследований составила не менее 10 м (2,2–2,5 м по воде и около 8 м по грунту). При данных благоприятных условиях – высоком УЭС воды (360 Ом) и отсутствии глин в разрезе – можно предположить, что глубинность метода может быть и значительно больше. Севернее оз. Верхнее была пробурена скважина № WSBS-2004–12, глубиной 5 метров, которая под слоем торфа и воды на глубине 250 см вскрыла слой сапропеля, а с глубины 480 см – слой песка [Олюнина, Романенко, 2007]. В этой, как и в других скважинах на полуострове Киндо, в нижней части, в подстилающих озерно-болотные отложения песках и опесчаненных илах обнаружена солоноватоводноморская диатомовая флора. Определение абсолютного возраста отложений в нижней части слоя сапропеля дало значение 8400 ± 110 лет. Таким образом, морские отложения распространены на полуострове Киндо как минимум до высот около 82 м [Олюнина, Романенко, 2007]. Можно сделать предположение, что нижняя часть осадочного выполнения озерной котловины оз. Верхнее с хорошо выраженной слоистостью

(комплексы 1 и 2 на рис. 3) может быть сложена морскими осадками.

Оз. Нижнее Нильмозеро. На озере было выполнено два георадиолокационных профиля длиной 180 и 150 м. Целью опытно-методических наблюдений, как и в рассмотренном выше примере, было изучение разреза и оценка глубинности исследований, как по воде, так и по разрезу. Измеренное удельное электрическое сопротивление (УЭС) воды составило 250 Ом.

На профиле 1 глубина воды не превышает 5,4 м (рис. 5). Ниже дна выделяется осадочный разрез мощностью около 10,0 метров (при $V = 5$ см/нс). Он представлен пятью осадочными комплексами. Подошвой этого осадочного чехла на данном профиле является отражение сложной конфигурации на глубинах около 650 нс, которое выделяется в левой и правой частях профиля 1 (рис. 5). Этот рефлектор предположительно является кровлей кристаллического фундамента, сложенного гнейсами (1) – ниже него отражений не наблюдается. Выше по разрезу выделено два осадочных комплекса (2.1 и 2.2), в которых отсутствуют оси синфазности отраженных волн, волновая картина является хаотической. Кроме отсутствия слоистости следует отметить довольно резкое изменение мощностей этих комплексов. По данным признакам оба комплекса отнесены к ледниковым отложениям, которые широко распространены по берегам этого озера. Отметим, что такие признаки характеризуют ледниковые отложения, выделяемые на прилегающих районах акватории пр. Великая Салма по данным другого волнового метода – сейсмоакустики [Кубышкина и др., 2012]. Их максимальная мощность на этом участке достигает 6 м.

Выше по разрезу выделено три осадочных комплекса (3, 4 и 5) общей мощностью до 5 м. Они отнесены к так называемому

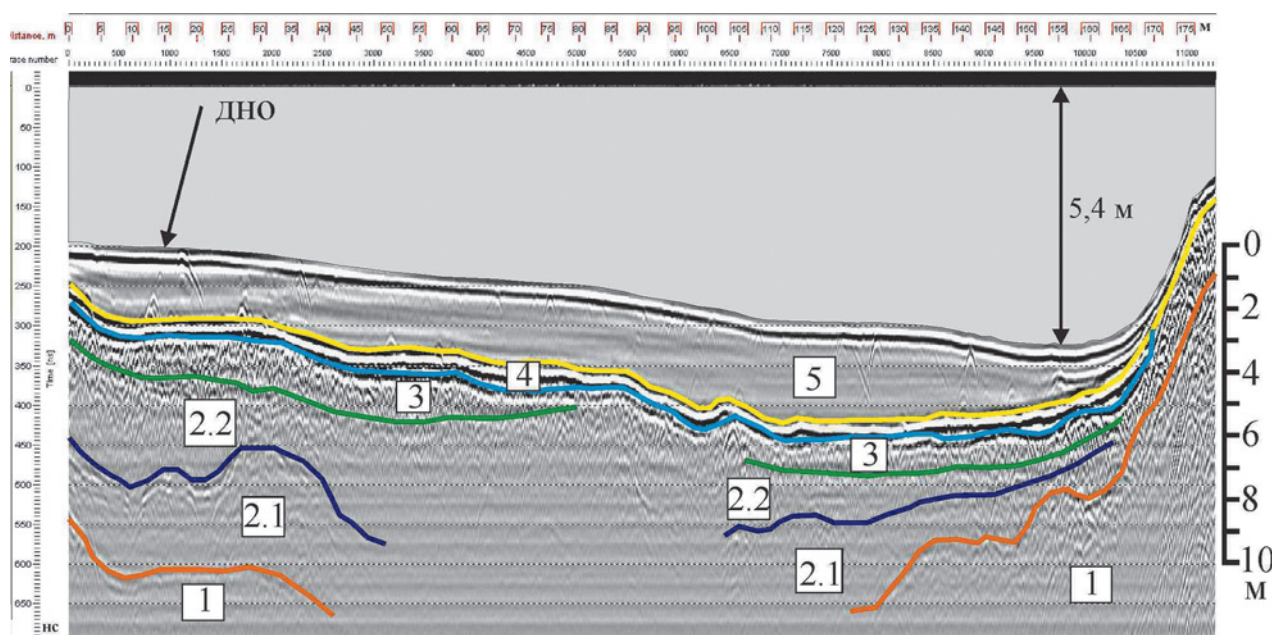


Рис. 5. Георадиолокационный разрез № 1 в оз. Нижнее Нильмозеро. Вертикальный масштаб для воды дан в метрах (использовалась скорость в воде 3,3 см/нс). 1 – фундамент; 2 (2.1 и 2.2) – ледниковые отложения; 3–4 – ледниково-озерные (?) отложения, 5 – современные озерные осадки. Здесь и далее вертикальная шкала для осадков, расположенная справа от профиля, рассчитывалась при скорости распространения электромагнитных волн 5 см/нс

надморенному комплексу. Границами между ними являются отчетливо выраженные оси синфазности отраженных волн (рис. 5). О генезисе комплексов 3 и 4 судить сложно, так как из-за небольшой мощности практически невозможно использовать один из основных признаков для обсуждения этого вопроса – волновую картину. На данном этапе изучения эти комплексы отнесены нами предположительно к ледниково-озерным. Самый молодой осадочный комплекс 5 (мощность около 3 м) в целом имеет слоистый тип волновой картины, распространен вдоль всего профиля, лишь на береговом склоне его мощность резко уменьшается. О его литологическом составе судить сложно, по-видимому, осадки представлены илами и песками. В центральной части профиля глубинность исследований резко уменьшается, что, вероятно, можно объяснить большим поглощением электромагнитных волн в ледниковых комплексах из-за увеличения их мощности.

Профиль 2 выполнен с той же методикой, что и профиль 1. Максимальная глубина воды также 5,4 м, длина – 150 м. На профиле отчетливо выделяются четыре осадочных комплекса (рис. 6). Кровлей самого нижнего комплекса является местами плохо выраженный отражающий горизонт, ниже которого осей синфазности большой протяженности не наблюдается. По-видимому, этот комплекс, так же как и на профиле 1 (рис. 5), можно соотнести

с породами фундамента (гнейсами). На нем залегает комплекс 2, кровлей которого является хорошо выраженный отражающий горизонт неровной конфигурации, вследствие чего его мощность резко меняется вдоль профиля от 25 до 120 нс в масштабе времени (приблизительно от 0,5 до 3,0 м при $V = 5$ см/нс). Волновая картина данного комплекса хаотическая, признаков слоистости не наблюдается. На рассматриваемом профиле этот комплекс слагает отдельные холмы шириной у основания до 30 м. Перечисленные признаки позволяют отнести его к ледниковым отложениям – морене (рис. 6). Залегающие выше отложения комплексов 3 и 4 выделяются как надморенные и аналогичны комплексам 3 и 5 на профиле 1. Следует только отметить, что аналога комплекса 4 на данном участке не обнаружено. Не исключено, что причиной этого является его крайне незначительная мощность. Самый молодой осадочный комплекс имеет слабо выраженную слоистость и залегает в понижениях между предполагаемыми моренными холмами. Его мощность достигает 2,8 м.

Очевидно, что данный комплекс сложен современными озерными отложениями – илами и песками. В результате настоящих исследований разрез представляется в следующем виде (снизу вверх): фундамент – ледниковый комплекс – надморенный комплекс (ледниково-озерные и озерные отложения). По

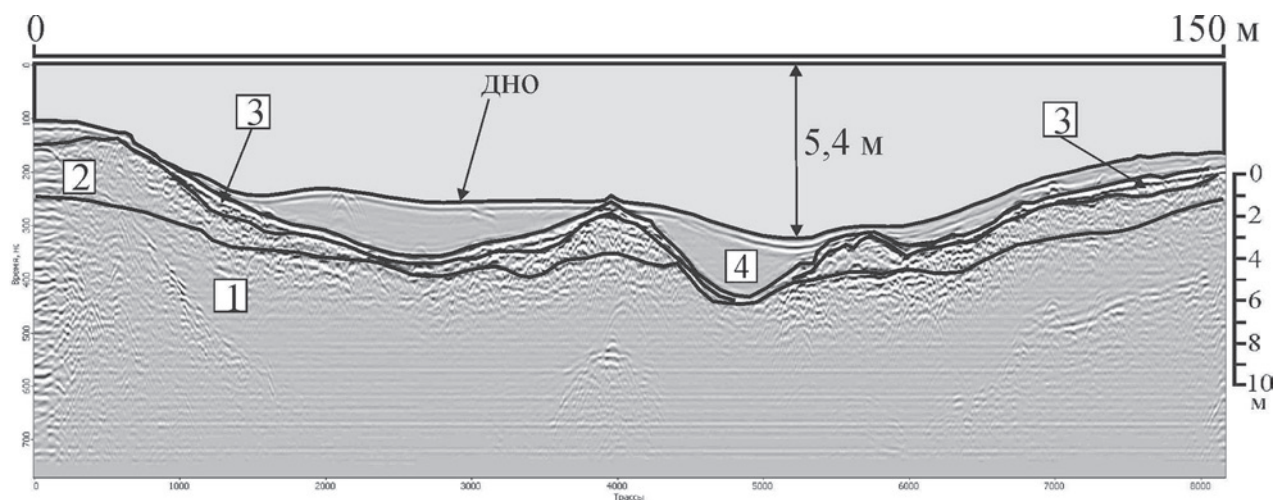
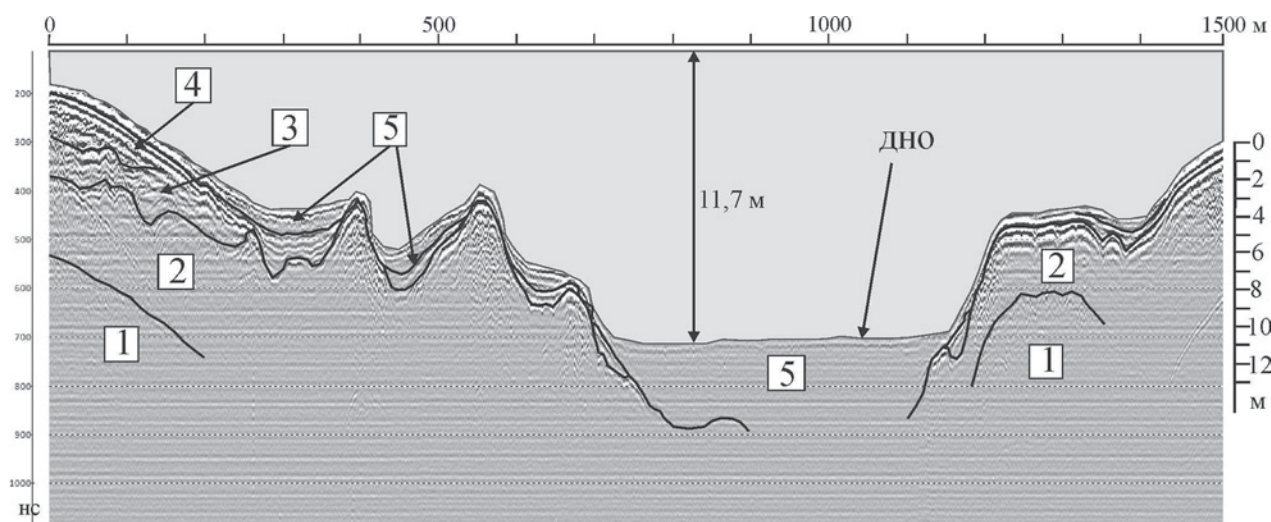


Рис. 6. Георадиолокационный разрез № 2 в оз. Нижнее Нильозеро. Вертикальный масштаб для воды дан в метрах (использовалась скорость в воде 3,3 см/нс). 1 – фундамент; 2 – ледниковые отложения; 3 – ледниково-озерные (?) отложения; 4 – современные озерные осадки



х 38

Рис. 7. Георадиолокационный профиль № 6 на оз. Вендюрском. Вертикальный масштаб для воды дан в метрах (использовалась скорость в воде 3,3 см/нс). 1 – фундамент; 2 – ледниковые отложения; 3, 4 – ледниково-озерные (?) отложения; 5 – современные озерные осадки

структурно-морфологическим признакам этот разрез аналогичен разрезам, изученным на прилегающих акваториях методом сейсмоакустики, за исключением надморенной толщи, которая на морских разрезах сложена в основном морскими осадками [Кубышкина и др., 2012].

Оз. Вендюрское. Удельное электрическое сопротивление воды составило около 550 Ом·м. На озере было выполнено семь георадиолокационных профилей – четыре поперек озера и три параллельно берегам. Поперечные профили располагались по самой глубоководной части, где по результатам предшествующих работ была определена максимальная глубина воды 12 метров. Профиль через глубоководную часть представлен на рис. 7. В осадочном

чехле было выделено пять осадочных комплексов. Самый древний комплекс, подошва которого по данным георадиолокации не выделяется, представлен, по-видимому, коренными породами фундамента (гнейсами). Отражения ниже его кровли не выделяются. Выше залегает комплекс 2, который характеризуется неровной кровлей, отсутствием отражающих границ и площадок (т. е. отсутствием слоистости) и резко изменчивой мощностью. По этим признакам его отнесли, предположительно, к ледниковым отложениям – морене. Видимая мощность комплекса около 6 м, но в центральной части профиля она может быть значительно больше. Комплексы 3 и 4 имеют суммарную мощность в пределах данного профиля

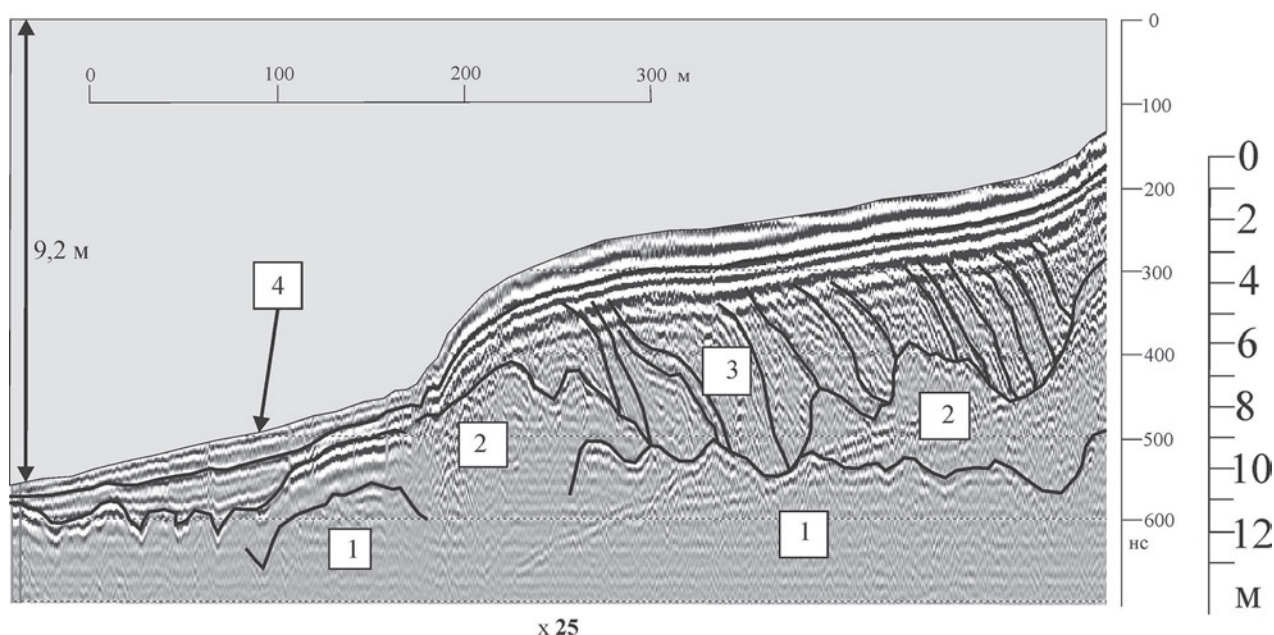


Рис. 8. Фрагмент георадиолокационного профиля № 7 на оз. Вендюрском. Вертикальный масштаб для воды дан в метрах (использовалась скорость в воде 3,3 см/нс). 1 – фундамент; 2 – ледниковые отложения (морена), 3 – ледниково-озерные (?) отложения, 4 – современные озерные осадки

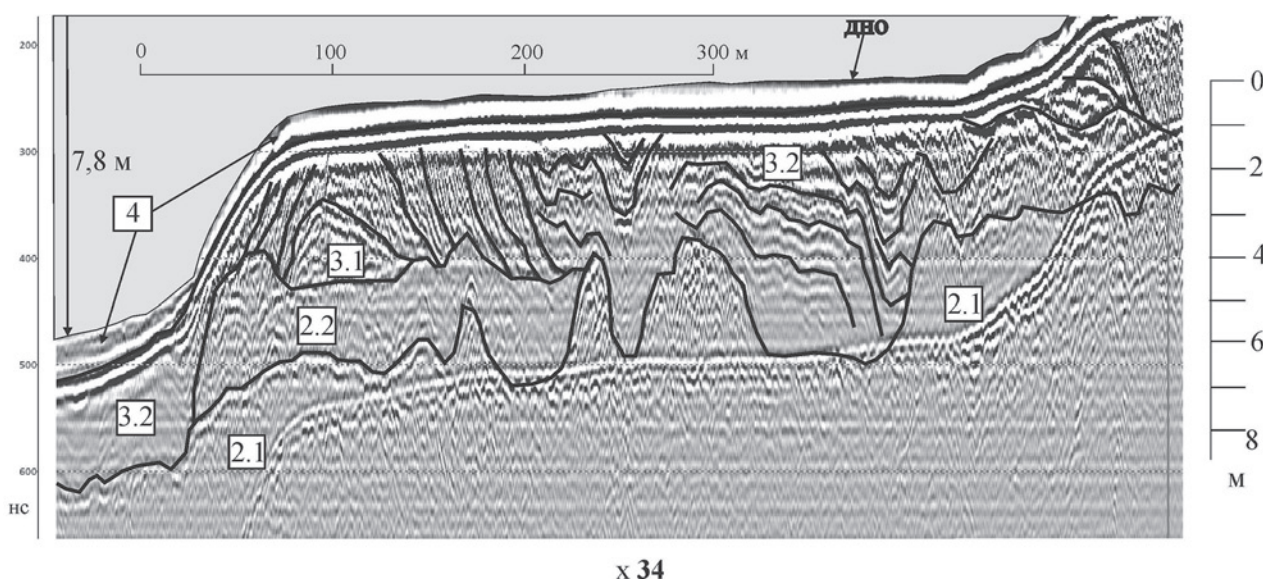
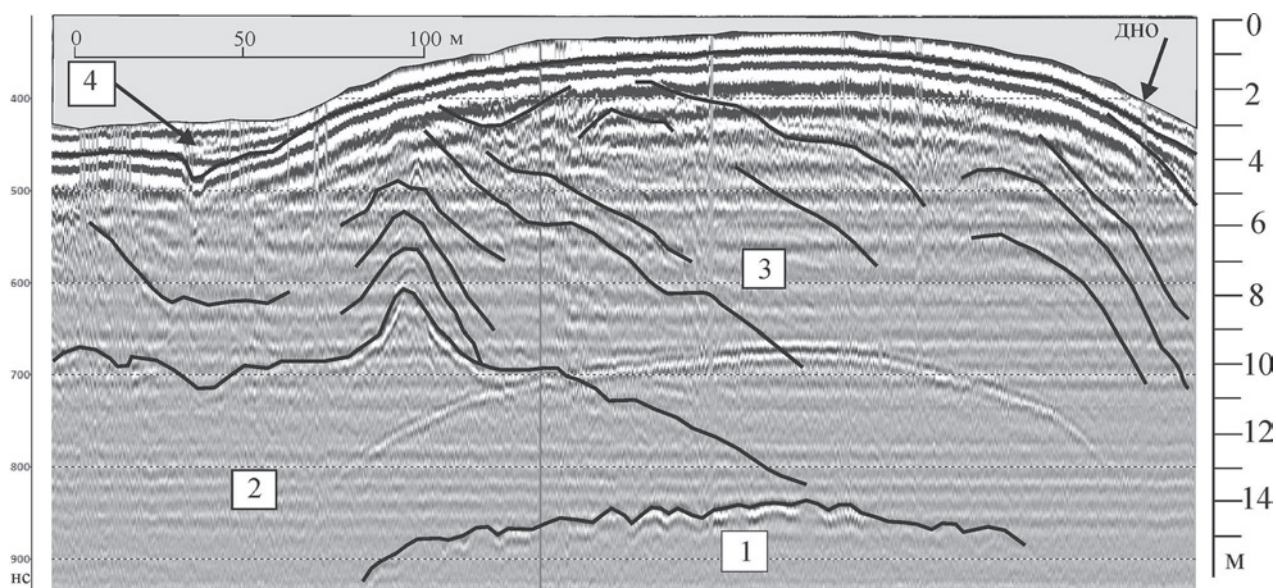


Рис. 9. Фрагмент георадиолокационного профиля № 3 на оз. Вендюрском. Вертикальный масштаб для воды дан в метрах (использовалась скорость в воде 3,3 см/нс). 2.1 и 2.2 – ледниковые отложения; 3.1, 3.2 – ледниково-озерные отложения; 4 – современные озерные осадки

не более 3,5–4,0 м и плохо выраженную слоистость. Комплекс 3 несогласно перекрывает комплекс 2, в целом нивелируя сложный рельеф его кровли (рис. 7). Осадочные комплексы 3 и 4 сложены, предположительно, ледниково-озерными отложениями. Самый молодой комплекс 5 со слабовыраженной слоистостью выделяется вдоль всего профиля, однако на бортах озера его мощность не превышает 2 м, тогда как в глубоководной части видимая мощность составляет уже 5 м, но она, вероятно, больше

(подошва слоя ни на одном из профилей не наблюдается на всем протяжении). Очевидно, что он сложен современными озерными осадками – илами, песками (?). В центральной части озера глубинность исследований уменьшается, что, предположительно, может быть обусловлено увеличившимся поглощением в ледниковых и озерных отложениях, где их мощность значительно возрастает (рис. 7). Аналогичные взаимоотношения выделенных комплексов наблюдаются и на других поперечных профилях.



x 16

Рис. 10. Фрагмент георадиолокационного профиля № 9 на оз. Вендюрском. Максимальная глубина воды около 7 м (использовалась скорость в воде 3,3 см/нс). 1 – фундамент; 2 – ледниковые отложения; 3 – ледниково-озерные отложения; 4 – современные озерные осадки

Показатели УЭС воды, глубинности по воде и по грунту

Название озера	УЭС воды	Максимальная глубина воды, м	Максимальная глубинность по грунту, м
Оз. Верхнее (ББС МГУ)	360 Омм	2,8	8,5
Оз. Нижнее Нильмозеро	250 Омм	5,4	11,0
Оз. Вендюрское	550 Омм	12,2	15,0

На рис. 8 и 9 даны фрагменты профилей, расположенные на прибрежных участках. В отличие от профиля, показанного на рис. 7, мощность комплекса 3 на этих участках достигает 7 м. Ввиду того, что его мощность здесь достаточно большая, можно анализировать волновую картину. Рассматриваемый комплекс представлен тонкослоистыми отложениями, строение которых значительно меняется на данных участках. Так, на рис. 8 наклон отражающих горизонтов комплекса 3 наблюдается в сторону берега (в северном направлении). На фрагменте профиля № 3 (рис. 9) строение отложений комплекса 3 существенно усложняется. Они также характеризуются хорошо выраженной слоистостью, но наклон отражающих горизонтов меняется по профилю – от субгоризонтальнослоистого до косослоистого, причем наклон может быть как в северном, так и в южном направлениях. Встречаются также отдельные линзовидные и холмообразные тела (3.1 на рис. 9). На обоих фрагментах выделены также предположительно ледниковые отложения, а на рис. 8 самая нижняя граница является, вероятно, кровлей фундамента. Видимая мощность ледникового комплекса достигает

5 м. Признаки его выделения аналогичны описанным выше. Современные озерные осадки имеют мощность не более 1,0–1,5 м.

Максимальная мощность отложений на изученном участке была выявлена на фрагменте профиля № 9, изображенного на рис. 10. Кровля осадочного комплекса 1, который представлен здесь, судя по волновой картине, породами фундамента, залегает на глубине около 15 м ниже поверхности дна. Перекрывающий его комплекс 2 имеет признаки, типичные для ледниковых отложений (см. выше). Осадочный комплекс 3 характеризуется в целом слоистым типом волновой картины и мощностью около 13 м. Следует отметить, что здесь достигнута максимальная глубинность георадиолокационных исследований (вода + отложения) – около 20 м. Современные озерные осадки мощностью не более 1,5 м плащеобразно перекрывают нижележащие отложения (рис. 10).

Заключение

В результате проведенных опытно-методических георадиолокационных исследований на трех озерах в Карелии были получены данные,

которые дают основания утверждать, что применение этого метода при изучении верхней части осадочного чехла является весьма эффективным (табл.).

Особо следует отметить, что измеренные значения УЭС воды намного превышали 200 Ом, что существенно больше значений, полученных нами на пресноводных акваториях в других районах. Для сравнения, УЭС воды на р. Москве не превышало 22–24 Ом, при этом отражения от поверхности дна наблюдались до глубины всего около 2,0–2,5 м. На изученных озерах в Карелии максимальная глубина воды, при которой выделялось отражение от дна, составила около 12 м. Глубинность по грунту также была весьма значительной – до 15 м ниже поверхности дна при глубине воды около 5 м, т. е. максимальная глубинность исследований (вода + отложения) была около 20 м. Данные значения получены с антенной 300 МГц, при исследованиях с более низкочастотными антеннами (например, 50–100 МГц) можно предположить, что глубинность по грунту может увеличиться до 20 метров. Верхняя часть четвертичного разреза, судя по значительной глубинности исследований, сложена в основном супесями и песками, что, наряду с высокими значениями УЭС воды, является весьма благоприятным фактором для использования этого сравнительно недорогого метода при решении различных задач в озерах Карелии до глубины воды около 15 м. Таким образом, георадиолокация является реальным средством изучения строения четвертичного покрова и его структуры в пресноводных озерных бассейнах Северо-Запада России. Для подтверждения выводов о литологическом составе комплексов необходима заверка бурением.

Литература

- Владов М. Л., Старовойтов А. В. Введение в георадиолокацию. М.: МГУ, 2005. 154 с.
- Владов М. Л., Старовойтов А. В., Калашников А. Ю. Георадиолокационные исследования на пресноводных акваториях // Инженерная геология. 2007. № 3. С. 47–51.
- Владов М. Л., Пятилова А. М. Влияние водного слоя на глубинность // Вестник МГУ. 2009. Серия 4, Геология. № 1. С. 63–66.
- Владов М. Л., Пятилова А. М., Калашников А. Ю. Экспериментальное изучение линейных объектов методом георадиолокации // Геофизика. 2010. № 2. С. 65–70.
- Кубышкина А. И., Старовойтов А. В., Токарев М. Ю. Строение осадочного чехла на модельном полигоне «Глубоководный» по данным сейсмоакустического профилирования. Комплексные исследования подводных ландшафтов в Белом море с применением дистанционных методов // Труды Беломорской биостанции. М.: МГУ, 2012. Т. 11. С. 34–40.
- Олюнина О. С., Романенко Ф. А. К вопросу о распространении морских отложений на Карельском берегу Белого моря // Материалы XVII международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Москва, 2007. Т. 1. С. 257–259.
- Озера Карелии / Александров Б. М., Зыцарь Н. А., Новиков П. И., Правдин И. Ф. и др. Петрозаводск: Госиздат Карельской АССР, 1959. 618 с.
- Рыжков Л. П. Озера бассейна Северной Ладogi. Петрозаводск: ПетрГУ, 1999. 204 с.
- Сейсмическая стратиграфия / Под ред. Ч. Пейтона. М.: Мир, 1982. Т. 1. 383 с.
- Слабунов А. И. Геология и геодинамика архейских подвижных поясов (на примере Беломорской провинции Фенноскандинавского щита). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 296 с.
- Старовойтов А. В. Интерпретация георадиолокационных данных. М.: МГУ, 2008. 187 с.
- Хаин В. Е. Региональная геотектоника. Внеальпийская Европа и Западная Азия. М.: Недра, 1977. 360 с.
- Arcone S. A., Finnegan D., Laatsch J. E. Bathymetric and subbottom surveying in shallow and conductive water // Proceedings of the 11th International Conference on Ground Penetrating Radar, on CDROM. 2006.
- Arcone S. A., Finnegan D., Boitnott G. GPR characterization of a lacustrine UXO site // Geophysics 75, 2010. WA221 – WA239.
- Bradford J. H., Brosten T. Advanced processing and acquisition methods to image within and beneath shallow water bodies with ground-penetrating radar // EAGE 69th Conference & Exhibition, June 2007.
- Chanu S. R., Chingkhai R. K., Sanoujam M., Kumar A. Lake sediment thickness estimation using Ground Penetrating Radar // IJRET (International Journal of Research in Engineering and Technology). 2014. Vol. 03. P. 42–46.
- Delaney A. J., Sellmann P. V., Arcone S. A. 1992. Sub-bottom profiling: a comparison of short-pulse radar and acoustic data // Proceedings of the 4th International Conference on Ground Penetrating Radar. P. 149–157.
- Fuchs M., Beres M. J., Anselmetti F. S. 2004. Sedimentological studies of western Swiss lakes with high-resolution reflection seismic and amphibious GPR profiling // Proceedings of the 10th International Conference on Ground Penetrating Radar, on CDROM.
- Gusmeroli A., Grosse G. Ground penetrating radar detection of subsnow slush on ice-covered lakes in interior Alaska // The Cryosphere, 6, 2012. P. 1435–1443.
- Jol H. M., Young R., Fisher T. G. et al. Ground penetrating radar of eskers, kame terraces and moraines: Alberta and Saskatchewan, Canada // 6th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR'96), Sendai, Japan. P. 439–443.
- Libohova Z., Doolittle J., Sims R. et al. Mapping the Subaqueous Soil of Lake Champlain's Missisquoi Bay Using Ground Penetrating Radar, Digital Soil Mapping and Field Measurements // Photogrammetric Engineering and Remote sensing. April 2014. P. 323–332.
- Mellet J. S. Profiling of ponds and bogs using ground-penetrating radar // Journal of Paleolimnology. 1995. 14. P. 233–240.

Moorman B. J., Michel F. A. Bathymetric mapping and sub-bottom profiling through lake ice with ground penetrating radar // *Journal of Paleolimnology*. 1997. 18. P. 61–73.

Van Overmeeren R. A. Radar facies of unconsolidated sediments in The Netherlands: A radar stratigraphy interpretation method for hydrogeology // *Journal of Applied Geophysics*. 1998. 40. P. 1–18.

Sambuelli L., Bava S. Case study: A GPR survey on a morainic lake in northern Italy for bathymetry, water volume and sediment characterization // *Journal of Applied Geophysics*, 2012, 81. P. 48–56.

Schmitt D. R., Aqil S., Bakhoriji A. et al. Rock Physics Facilities and Research in the Experimental Geophysics Group at the University of Alberta // *CSEG RECORD-ER*, January 2012. P. 40–46.

Schwamborn G. J., Dix J. K., Bull J. M., Rachold V. High-resolution seismic and ground penetrating radar-geophysical profiling of a thermokarst lake in the western Lena delta, northern Siberia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2002. 13. P. 259–269.

Smith D. G., Jol H. M. Radar structure of a Gilbert-type delta, Peyto Lake, Banff National Park, Canada // *Sedimentary Geology*. 1997. 113. P. 195–209.

Ulriksen C. P. F. Application of impulse radar to civil engineering: Ph. D. diss., Lund University of Technology. 1982.

Поступила в редакцию 16.12.2015

References

Khain V. E. Regional'naya geotektonika. Vneal'piiskaya Evropa i Zapadnaya Aziya [Regional geotectonics. Trans-Alpine Europe and West Asia]. Moscow: Nedra, 1977. 360 p.

Kubyshkina A. I., Starovoitov A. V., Tokarev M. Yu. Stroenie osadochnogo chekhla na model'nom poligone "Glubokovodnyi" po dannym seismoakusticheskogo profilirovaniya. Kompleksnye issledovaniya podvodnykh landshaftov v Belom more s primeneniem distantsionnykh metodov [The structure of sedimentary cover on the "Glubokovodnyi" test site according to seismoacoustic profiling. Complex studies on underwater landscapes in the White Sea, using remote methods]. *Trudy Belomorskoj biostantsii* [Proc. White Sea Biological Station]. Moscow: MGU, 2012. Vol. 11. P. 34–40.

Olyunina O. S., Romanenko F. A. K voprosu o rasprostraneni morskikh otlozhenii na Karel'skom beregu Belogo moray [On the distribution of marine sediments on the Karelian coast of the White Sea]. *Materialy XVII mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (Shkoly) po morskoi geologii* [Proc. 17th intern. sci. conf. (school) on marine geology]. Moscow, 2007. Vol. 1. P. 257–259.

Ozera Karelii [Lakes of Karelia]. B. M. Aleksandrov, N. A. Zyt'sar', P. I. Novikov, I. F. Pravdin et al. Petrozavodsk: Gosizdat Karel'skoi ASSR, 1959. 618 p.

Ryzhkov L. P. Ozera basseina Severnoi Ladogi [Lakes of the northern Ladoga basin]. Petrozavodsk: PetrGU, 1999. 204 p.

Seismicheskaya stratigrafiya [Seismic stratigraphy]. Ed. Ch. Peiton. Moscow: Mir, 1982. Vol. 1. 383 p.

Slabunov A. I. Geologiya i geodinamika arkhaiskikh podvizhnykh pojasov (na primere Belomorskoj provintsii Fennoskandinavskogo shchita) [Geology and geodynamics of the Archean mobile belts (case study of the Belomorian province of the Fennoscandian Shield)]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2008. 296 p.

Starovoitov A. V. Interpretatsiya georadiolokatsionnykh dannyykh [Interpretation of GPR data]. Moscow: MGU, 2008. 187 p.

Vladov M. L., Starovoitov A. V. Vvedenie v georadiolokatsiyu [Introduction to georadiolocation]. Moscow: MGU, 2005. 154 p.

Vladov M. L., Starovoitov A. V., Kalashnikov A. Yu. Georadiolokatsionnye issledovaniya na presnovodnykh akvatoriyakh [GPR surveys on freshwater reservoirs].

Inzhenernaya geologiya [Engineering geology]. 2007. No. 3. P. 47–51.

Vladov M. L., Pyatilova A. M. Vliyanie vodnogo sloya na glubinnost' [Influence of the water layer upon the depth]. *Vestnik MGU. Seriya 4, Geologiya* [MSU Vestnik. Ser. 4, Geology]. 2009. No. 1. P. 63–66.

Vladov M. L., Pyatilova A. M., Kalashnikov A. Yu. Eksperimental'noe izuchenie lineinykh ob'ektov metodom georadiolokatsii [Experimental studies of linear objects using georadar technology]. *Geofizika* [Russ. Geophysics J.]. 2010. No. 2. P. 65–70.

Arcone S. A., Finnegan D., Laatsch J. E. Bathymetric and subbottom surveying in shallow and conductive water. 2006, Proceedings of the 11th International Conference on Ground Penetrating Radar, on CDROM.

Arcone S. A., Finnegan D., Boitnott G. GPR characterization of a lacustrine UXO site. 2010, *Geophysics* 75, WA221 – WA239.

Bradford J. H., Brosten T. Advanced processing and acquisition methods to image within and beneath shallow water bodies with ground-penetrating radar. EAGE 69th Conference&Exhibition, June 2007.

Chanu S. R., Chingkei R. K., Sanoujam M., Kumar A. Lake sediment thickness estimation using Ground Penetrating Radar. 2014, *IJRET* (International Journal of Research in Engineering and Technology), vol. 03. P. 42–46.

Delaney A. J., Sellmann P. V., Arcone S. A. 1992. Sub-bottom profiling: a comparison of short-pulse radar and acoustic data. Proceedings of the 4th International Conference on Ground Penetrating Radar. P. 149–157.

Fuchs M., Beres M. J., Anselmetti F. S. 2004. Sedimentological studies of western Swiss lakes with high-resolution reflection seismic and amphibious GPR profiling. Proceedings of the 10th International Conference on Ground Penetrating Radar, on CDROM.

Gusmeroli A., Grosse G. Ground penetrating radar detection of subsnow slush on ice-covered lakes in interior Alaska. *The Cryosphere*, 6, 2012. P. 1435–1443.

Jol H. M., Young R., Fisher T. G., Smith D. G., Meyers R. A. Ground penetrating radar of eskers, kame terraces and moraines: Alberta and Saskatchewan, Canada. 6th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR'96), Sendai, Japan. P. 439–443.

Libohova Z., Doolittle J., Sims R., Villars T., West L. Mapping the Subaqueous Soil of Lake Champlain's Missisquoi Bay Using Ground Penetrating Radar, Digital Soil Mapping and Field Measurements. Photogrammetric Engineering and Remote sensing. April 2014. P. 323–332.

Mellet J. S. Profiling of ponds and bogs using ground-penetrating radar. 1995, *Journal of Paleolimnology*, 14. P. 233–240.

Moorman B. J., Michel F. A. Bathymetric mapping and sub-bottom profiling through lake ice with ground penetrating radar. 1997, *Journal of Paleolimnology*, 18. P. 61–73.

Van Overmeeren R. A. Radar facies of unconsolidated sediments in The Netherlands: A radar stratigraphy interpretation method for hydrogeology. 1998, *Journal of Applied Geophysics*, 40. P. 1–18.

Sambuelli L., Bava S. Case study: A GPR survey on a morainic lake in northern Italy for bathymetry, water volume and sediment characterization. *Journal of Applied Geophysics*, 2012, 81. P. 48–56.

Schmitt D. R., Aqil S., Bakhoriji A., Bouzidi Y., Chowdhury M. H., Kofman R., Melendez J., Njiekak G., Ortiz-Osornio M., Schijns H., Snow B., Yam H. Rock Physics Facilities and Research in the Experimental Geophysics Group at the University of Alberta. *CSEG RECORDER*, January 2012. P. 40–46.

Schwaborn G. J., Dix J. K., Bull J. M., Rachold V. High-resolution seismic and ground penetrating radar-geophysical profiling of a thermokarst lake in the western Lena delta, northern Siberia. 2002, *Permafrost and Periglacial Processes*, 13. P. 259–269.

Smith D. G., Jol H. M. Radar structure of a Gilbert-type delta, Peyto Lake, Banff National Park, Canada. 1997. *Sedimentary Geology*, 113. P. 195–209;

Ulriksen C. P. F. Application of impulse radar to civil engineering: 1982. PhD. diss., Lund University of Technology.

Received December 16, 2015

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Старовойтов Анатолий Васильевич

доцент геологического факультета, к. г.-м. н.
Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова
Ленинские горы, ГСП-1, Москва
Россия, 119991
эл. почта: starovoytov_msu@mail.ru
тел.: (495) 9394370

Токарев Михаил Юрьевич

ст. преподаватель геологического факультета,
ген. директор ООО «Центр анализа сейсмических
данных МГУ им. М. В. Ломоносова»
Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова
Ленинские горы, ГСП-1, Москва
Россия, 119991
эл. почта: tokarev@decogeo.com
тел.: (495) 9394370

Марченко Антон Леонардович

научный сотрудник, к. ф.-м. н.
Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова, геологический факультет
Ленинские горы, ГСП-1, Москва
Россия, 119991
эл. почта: antonmarchenko@mail.ru
тел.: (495) 9391230

Субетто Дмитрий Александрович

директор, д. г. н., проф.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: dsubetto@nwpi.krc.karelia.ru
тел.: (8142) 576381

CONTRIBUTORS:

Starovoytov, Anatoly

M. V. Lomonosov Moscow State University
Leninskie Gory, GSP-1,
119991 Moscow, Russia
e-mail: starovoytov_msu@mail.ru
tel.: (495) 9394370

Tokarev, Mikhail

M. V. Lomonosov Moscow State University
Leninskie Gory, GSP-1,
119991 Moscow, Russia
e-mail: tokarev@decogeo.com
tel.: (495) 9394370

Marchenko, Anton

M. V. Lomonosov Moscow State University
Leninskie Gory, GSP-1,
119991 Moscow, Russia
e-mail: antonmarchenko@mail.ru
tel.: (495) 9391230

Subetto, Dmitry

Northern Water Problems Institute,
Karelian Research Centre, Russian Academy of
Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: dsubetto@nwpi.krc.karelia.ru
tel.: (8142) 576381

Рыбалко Александр Евменьевич

проф., д. г.-м. н.
Институт наук о Земле
Санкт-Петербургского государственного университета
10 линия Васильевского острова, 33/35, Санкт-Петербург,
Россия, 199178
эл. почта: alek-rybalko@yandex.ru
тел.: +79119118752

Алешин Михаил Игоревич

магистрант
Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова, геологический факультет
Ленинские горы, ГСП-1, Москва
Россия, 119991
эл. почта: maan@ifz.ru
тел.: (926) 2202947

Rybalko, Aleksandr

Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University
33/35 10th Line, Vasiljevskij Ostrov, 199178 St. Petersburg,
Russia
e-mail: alek-rybalko@yandex.ru
tel.: +79119118752

Aleshin, Mikhail

M. V. Lomonosov Moscow State University,
Leninskie Gory, GSP-1,
119991 Moscow, Russia
e-mail: maan@ifz.ru
tel.: (926) 2202947

УДК 556.555.7+574

МОДЕЛЬ ПОДЛЕДНОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КРУПНОГО ОЗЕРА, ОСНОВАННАЯ НА ПРИМЕНЕНИИ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

В. В. Меншуткин¹, Н. Н. Филатов²

¹ Санкт-Петербургский экономико-математический институт РАН

² Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Предлагается модель динамики экосистемы подо льдом крупного озера с использованием клеточных автоматов, позволяющая учитывать пространственные неоднородности, процессы перемешивания, подледной конвекции, локальные особенности окружающей среды. Использовались данные уникальных комплексных экспериментов подо льдом, проводимых на Онежском озере в период от устойчивого ледяного покрова до начала его разрушения.

Ключевые слова: модель; озеро; экосистема; зимний режим; клеточные автоматы.

V. V. Menshutkin, N. N. Filatov. A MODEL OF UNDER-ICE ECOLOGICAL SYSTEM OF A LARGE LAKE BASED ON THE APPLICATION OF CELLULAR AUTOMATA

A cellular automata model for under-ice dynamics of a large lake ecosystem is suggested, which enables taking into account spatial inhomogeneities, mixing processes, under-ice convections, local features of the environment. Data from unique integrated under-ice experiments performed on Lake Onego during steady ice cover period until the beginning of its degradation were employed.

Key words: model; lake; ecosystem; winter conditions; cellular automata.

Введение

Исследования биоты во льду и в подледном слое были начаты в 70-х годах XX века в морях Арктики и Антарктики [Мельников, 1989; Arrigo, 1997], которые показали, что в многолетних льдах развиваются многочисленные микроскопические водоросли и беспозвоночные животные, как пресноводные, так и морские. При этом водоросли в снегу и во льду при фотосинтезе образуют биомассу, которая может значительно превосходить биомассу фитопланктона

в воде подо льдом. При потеплении климата проявились заметные изменения в составе, структуре и функционировании биологических сообществ во льду и подо льдом.

Существенно меньше сведений имелось о функционировании озерных систем подо льдом; исследования были сосредоточены в основном на малых и средних озерах [Kirillin et al., 2012], в то время как подледный режим крупнейших озер мира до сих пор изучен в гораздо меньшей степени. Шуртер [Surter et al., 2012] образно написал по этому поводу: «Мы

знаем гораздо больше о тропических озерных экосистемах и даже о полярных озерах с постоянным ледяным покровом, чем о переносах вещества и энергии во время долгих зим в озерах умеренной зоны Евразии и Северной Америки». В исследованиях биологических сообществ льда оз. Байкал [Bondarenko et al., 2012] выявлено обилие и слоистое распределение микроводорослей. Также выявлена низкая концентрация диоксида кремния, фосфора и нитратов, что может быть обусловлено высокой метаболической активностью экстремофилов во льду озера. Таким образом, микроорганизмы во льду пресноводных озер поддерживают высокую активность, и это свидетельствует о том, что имеются достаточные условия для их жизни подо льдом глубоких озер. В работе [Митрофанова и др., 2006] по исследованию биоты подо льдом глубокого Телецкого озера были выявлены диатомовые комплексы с достаточно высоким удельным содержанием хлорофилла в клетках, что позволяет сохранять экосистему озера в устойчивом состоянии и поддерживать процессы самоочищения.

Важно отметить, что подо льдом крупных озер исследовались отдельные элементы экосистемы, в то время как комплекс физико-химико-биологических процессов оставался «белым пятном» лимнологии. Главной причиной недостатка зимних наблюдений на крупных, в особенности Великих американских озерах или великих озерах Европы, которые покрываются льдом не полностью, имеют трещины, разводья, промоины и полыньи [Kondratyev, Filatov, 1999; Assel, 2003], является практическая трудность организации долговременных комплексных полевых исследований с ледяного покрова. В последние 20 лет значительный

интерес вызывают проблемы реакции озерных экосистем на глобальное потепление, требуется более глубокое понимание функционирования озерных экосистем подо льдом, роли озер с ледовым покровом в глобальном углеродном балансе. Для Великих американских озер были изучены сдвиги в микробиологическом сообществе, связанные с потеплением климата и уменьшением площади и толщины ледяного покрова на озерах [McKay et al., 2011; Rozmarynowycz, 2014]. Для Ладожского и Онежского озер имелось очень мало экспериментальных сведений о жизни подо льдом [Petrova, 1986], а в развитых 3-D моделях экосистем крупных стратифицированных озер для сезонного и климатического масштабов принималось «отсутствие» жизни подо льдом [Rukhovets, Filatov, 2010; Меншуткин и др., 2014]. В марте 2013 г. в Петрозаводской губе Онежского озера в рамках совместного проекта ИВПС КарНЦ РАН и Университета Bowling Green State (США) были выполнены отборы проб на химический и биологический анализы как в самом ледовом покрове, так и в воде подо льдом. Анализ собранных данных позволил выявить значительные различия в видовом составе флоры во льду и в воде Великих американских озер и Онежского озера [Rozmarynowycz, 2014].

В марте 2015 г. были впервые начаты комплексные российско-швейцарские исследования по проекту «Ладожское озеро: жизнь подо льдом – взаимодействие процессов подо льдом в результате глобальных изменений» [Филатов, Тержевик, 2015; Terzhevik, 2015] благодаря помощи фонда ЭЛЕМО (Швейцария), который выделил грант на 2015–2016 гг. В комплексных исследованиях 2015 г.

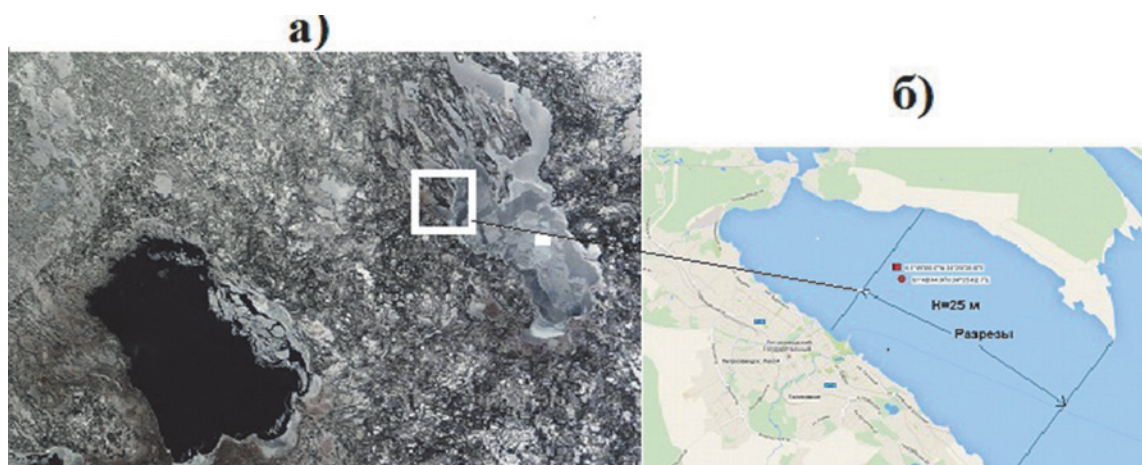


Рис. 1. Спутниковый снимок Ладожского и Онежского озер 13 марта 2015 г. (а) и схема расположения станций измерений и разрезов в Онежском озере (б)

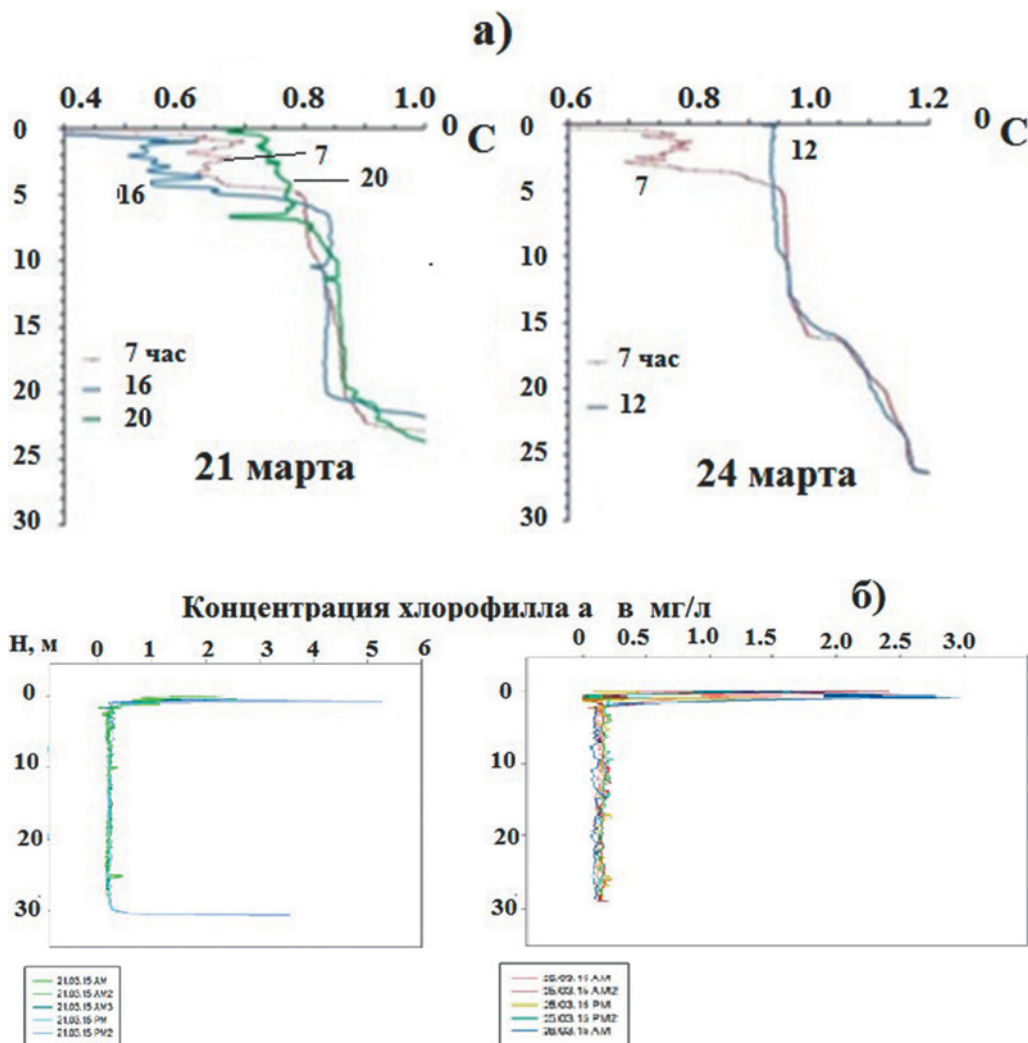


Рис. 2. Примеры распределения температуры воды (а) концентрации хлорофилла а (б) 21 и 24 марта 2015 г. в основной точке комплексных измерений

принимали участие около 40 специалистов из России, Швейцарии, Франции, Германии, Швеции и других стран. По программе исследований предполагалось изучение как Ладожского, так и Онежского озер, представляющих единую систему великих озер Европы [Rukhovets, Filatov, 2010]. Из-за отсутствия ледового покрова в северной части Ладожского озера комплексные мультидисциплинарные исследования были организованы на Онежском озере, полностью покрытом льдом. В месте измерений (рис. 1) толщина ледяного покрова была около 30 см, а период исследований характеризовался началом подледной конвекции, влияющей на распределение и трансформацию биоты и вещества в озере.

Основная идея комплексного российско-швейцарского проекта состоит в проведении в зимний период на Ладожском и Онежском озерах междисциплинарных комплексных

натурных наблюдений за гидрофизическими и химико-биологическими параметрами воды, включая контактный слой «вода-лед» и поверхностный слой воды (0–30 м), и собственно льда; в изучении структуры и функциональных характеристик сообществ гидробионтов в этих системах, с оценкой закономерностей формирования качества вод, а также изучением влияния изменений климата на экосистемы озер. Важной задачей проекта было описать сложные нелинейные процессы, происходящие в экосистемах озер подо льдом. Сделать это традиционным путем создания моделей, основанных на решении систем нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, – достаточно сложная задача [Меншуткин и др., 2014], поэтому в качестве альтернативы были использованы т. н. клеточно-автоматные модели, позволяющие моделировать сложные нелинейные процессы, в том числе и процессы

самоорганизации, используя сравнительно простые правила [Беркович, 2003; Афанасьев, 2012].

Материалы и методы

Комплексные экспериментальные исследования

В семи подпроектах исследованы процессы перемешивания, переноса и трансформации вещества, выполнены исследования подледной конвекции, видовой состав фито- и зоопланктона и бактерий, даны оценки переноса углерода по трофической цепочке, изучался химический состав вод, донные отложения. Проведены климатические и палеоклиматические исследования, контактные и спутниковые измерения ледового покрова. Кроме зимних исследований для изучения сезонных изменений экосистем проводились комплексные исследования как на Ладожском, так и на Онежском озере в весенне-летний и осенний периоды – до и после ледостава. Результаты этих исследований важны для понимания функционирования озерных экосистем подо льдом великих озер Европы, которые несколько месяцев в году полностью или частично покрываются ледяным покровом. На рисунке 2 представлены примеры измерений распределения температуры воды (а) и концентрации хлорофилла *a* (б) в разные даты экспериментов (21 и 24 марта 2015 г.) и время суток (7, 16 и 20 час.).

Модель динамики экосистемы подо льдом крупного озера с использованием клеточных автоматов

Основная задача настоящей работы – описать синергетику комплекса физико-химико-биологических процессов в период от устойчивого ледяного покрова до начала его разрушения в условиях подледной конвекции для лучшего понимания функционирования сложной экосистемы подо льдом. Учитывая слабое горизонтальное перемешивание и относительную однородность происходящих подо льдом процессов, предлагается модель экологической системы подледного слоя воды в озере с использованием моделей клеточных автоматов [Wolfram, 2002; Астафьев и др., 2012]. По существу, это означает переход от «традиционного» метода описания экологической системы с помощью системы дифференциальных уравнений [Меншуткин и др., 2014] к использованию представлений дискретной математики. Поэтому метод численного решения нелинейных

уравнений при помощи клеточных автоматов представляет собой шаг в этом направлении. Метод нашел практическое применение при моделировании наземных сообществ, нейронных сетей, передаче энергии в пограничном слое движущегося газа или жидкости, а также был использован для моделирования биоты в оз. Байкал [Афанасьев, 2012]. Для работы клеточного автомата требуется задание начального состояния всех ячеек и правил перехода ячеек из одного состояния в другое. На каждой итерации, используя правила перехода и состояния соседних ячеек, определяется новое состояние каждой ячейки. Так, например, область моделирования оз. Байкал составляла около 5 млн ячеек, для чего использовались мощные вычислительные средства для распараллеливания вычислительных процессов [Афанасьев, 2012].

В случае экологической системы подледного слоя воды пространство подо льдом разбивается на множество дискретных объемов воды, характеризующихся температурой, плотностью, освещенностью, концентрациями растворенного в воде кислорода, биогенов в виде неорганических соединений фосфора и азота, а также биомасс фито-, бактерио- и зоопланктонных организмов. Подобный подход уже предлагался в свое время Бернардом Паттеном [Patten, 1982], который ввел даже специальное понятие «энвирон». Основное свойство клеточных автоматов заключается в том, что каждый такой автомат может изменять свое состояние не только в зависимости от своего предыдущего состояния и внешних воздействий, но и в зависимости от состояния соседних автоматов.

Для подледного слоя воды основным процессом взаимодействия между элементарными водными массами является перемешивание, обусловленное подледной конвекцией, турбулентным перемешиванием [Меншуткин, 1964; Wuest et al., 2005; Terzhevik, 2015]. В крупных озерах описаны и другие процессы, влияющие на особенности распределения водных масс, например, подледные течения, внутренние волны, сейши, а также выделение газов из донных отложений и т. д. [Гранин и др., 1998; Филатов, 1983; Wuest et al., 2005; Terzhevik, 2015], но в первом приближении при создании комплексной модели для Онежского озера ими можно пренебречь. Для описания процесса перемешивания используем «наивное» представление о перемешивании, при котором два соседних элементарных объема воды в условиях плотностной неустойчивости или под влиянием внешних воздействий могут образовать некоторый элементарный вихрь. В настоящее

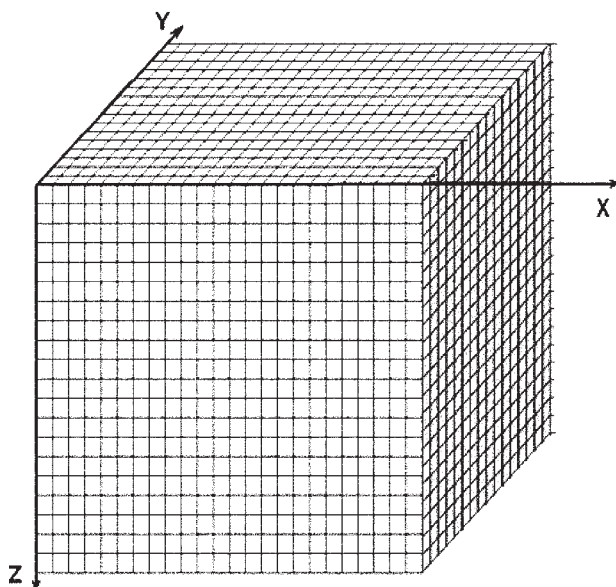


Рис. 3. Схема расположения клеточных автоматов в подледном слое воды

время с использованием быстродействующей вычислительной техники появилась возможность непосредственного моделирования вероятностных процессов. Такой подход получил название метода Монте-Карло или метода статистических испытаний. Это позволяет интерпретировать «элементарные вихри» не в метафорическом, а в самом буквальном смысле, что и было осуществлено в предлагаемой модели.

Результаты

Пространство подо льдом было представлено в виде ячеек – клеточных автоматов. На первом этапе не ставилась задача точно воспроизвести комплекс процессов подо льдом Онежского озера по результатам измерений 14–27.03.2015 г., тем более такие тонкие процессы и явления, которые были выявлены в ходе зимних исследований 2015 г.: микроструктура, внутренние волны, когда в течение суток величина скорости диссипации турбулентной энергии менялась на два порядка, а данные наблюдений в подледном слое не выявили четкой закономерности в вертикальном распределении хлорофилла *a* в разных фазах подледной конвекции [Zdrovennov et al., 2015]. Более того, общая концентрация хлорофилла *a*, профили его концентрации не показали существенных изменений в течение суток, также небольшие вариации были характерны для распределения концентрации биогенов как по вертикали в течение дня, так и за весь период измерений 14–27.03.2015 г. [Annual Report...,

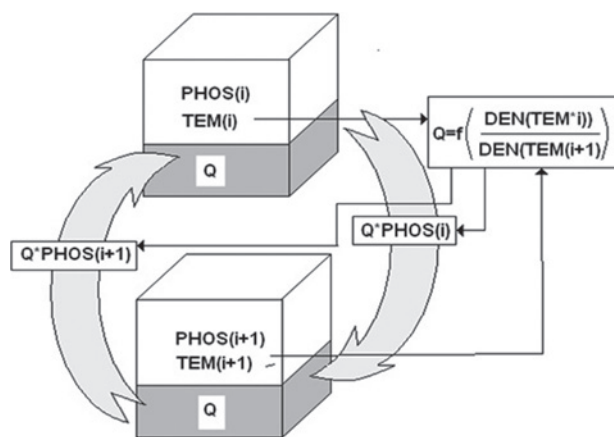


Рис. 4. Схема переноса вещества элементарным вихрем между двумя клеточными автоматами в вертикальном направлении

2015; Terzevik, 2015]. Важной при создании модели была оценка увеличения толщины конвективного перемешанного слоя со скоростью примерно 1 м/сут. Неожиданными стали предварительные выводы в комплексном отчете [Annual Report..., 2015] о возможной лимитирующей роли азота в экосистеме озера, которые были получены в 2015 г. Эти сведения будут проверяться в экспериментах на Ладожском и Онежском озерах в 2016 г.

На рисунке 3 представлена схема расположения клеточных автоматов в подледном слое воды. В первом приближении рассматривается прямоугольная сетка из 18000 автоматов (20 по глубине и 30 на 30 по горизонтали). Верхний ряд автоматов примыкает к нижней поверхности льда, а нижний – к дну водоема. То есть вертикальный масштаб сетки составлял примерно 1 м. Состояние автомата описывается температурой воды (TEM), концентрацией неорганического фосфора, растворенного в воде (PHOS), и биомассой фитопланктона (PHYTO).

На рисунке 4 представлена схема элементарного вихря, участвующего во взаимодействии двух клеточных автоматов, расположенных по вертикали.

Предполагается, что в течение одного временного шага доля Q от объема ячейки, занимаемой верхним автоматом, переместится в нижнюю ячейку, а аналогичная доля Q от объема нижней ячейки переместится в верхнюю ячейку. После такого перемещения внутри каждой ячейки происходит полное перемешивание с выравниванием температуры, концентрации

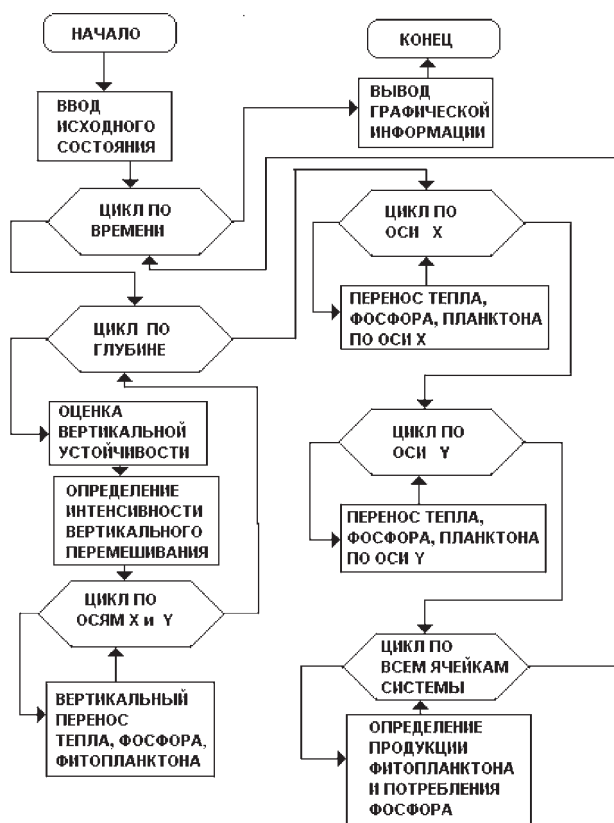


Рис. 5. Блок-схема моделирующего алгоритма

неорганического фосфора и биомассы фитопланктона. Например, для фосфора это выражается в виде следующих соотношений:

$$\begin{aligned} \text{PHOS}(i, t+1) &= (1 - Q) * \text{PHOS}(i, t) + \\ &+ Q * \text{PHOS}(i+1, t), \\ \text{PHOS}(i+1, t+1) &= (1 - Q) * \text{PHOS}(i+1, t) + \\ &+ Q * \text{PHOS}(i, t). \end{aligned}$$

Величина Q полагается функцией разности плотностей воды в верхней и нижней ячейках. Как известно, в диапазоне от 0 до 4 °C с увеличением температуры воды ее плотность DEN увеличивается. Поэтому нагревание верхних слоев воды подо льдом приводит к уменьшению устойчивости. В модели принято линейное эмпирическое соотношение:

$$Q = \exp(-0,69 * DEN(TEM(i)) / DEN(TEM(i+1))).$$

Это соотношение основывается на упрощенном представлении числа Ричардсона. Величина Q полагается шумящим параметром, что естественно при описании процессов турбулентного перемешивания.

$$QQ = Q + 0,1 * (RND - 1),$$

где QQ – результирующая величина, используемая в модели, RND – случайное число, равномерно распределенное в диапазоне от 0 до 1.

На рисунке 5 представлена блок-схема моделирующего алгоритма.

Работа модели начинается с ввода начального распределения температур и концентраций фосфора по всем автоматам системы. Начальные значения биомасс фитопланктона полагаются нулевыми. Интенсивность проникающей под лед солнечной радиации полагается убывающей по экспоненте с глубиной.

Время работы модели предполагается равным периоду от начала прогрева воды подо льдом до установления гомотермии и разрушения ледяного покрова. В первом приближении, как показали измерения, это время принимается равным для исследуемых озер 40 суткам. Продолжительность временного шага принята равной 2 часам, причем на первом этапе суточные колебания освещенности и теплового потока не принимаются во внимание.

Внутри временного цикла сначала осуществляется моделирование вертикального переноса тепла и растворенных веществ, как это было описано выше. Следует отметить, что концентрация неорганического фосфора в придонном слое полагается постоянной, что соответствует постоянному притоку фосфора из донных отложений в воду. Результаты моделирования вертикального переноса распространяются на все автоматы системы.

Следующим этапом в работе модели является имитация горизонтального переноса тепла, растворенных веществ и фитопланктона. В этом случае интенсивность вихревого обмена полагается постоянной и не зависящей от плотности воды в соседних ячейках. Моделирование осуществляется в два приема, сначала по оси X , а затем по оси Y .

Заключительным этапом обработки одного временного шага модели является определение продукции и биомассы фитопланктона. При определении продукции ($PROD$) применяется закон минимума Либиха, широко используемый в моделях водных экосистем [Меншуткин, 2010].

$$\begin{aligned} PROD &= K1 * \min(K2 * LIGHT(i), PHOS(i)), \\ PHYTO(i, t+1) &= (1 - M) * PHYTO(i, t) + PROD, \\ PHOS(i, t+1) &= PHOS(i, t) - PROD. \end{aligned}$$

Здесь M – коэффициент естественной смертности фитопланктона (потребление фитопланктона зоопланктонными фильтраторами не учитывается), $K1$ и $K2$ – коэффициенты согласования размерностей переменных.

После прохождения временного цикла происходит вывод графиков вертикального распределения величин TEM , $PHOS$ и $PHYTO$ как по времени, так и по глубине, а также диаграмм

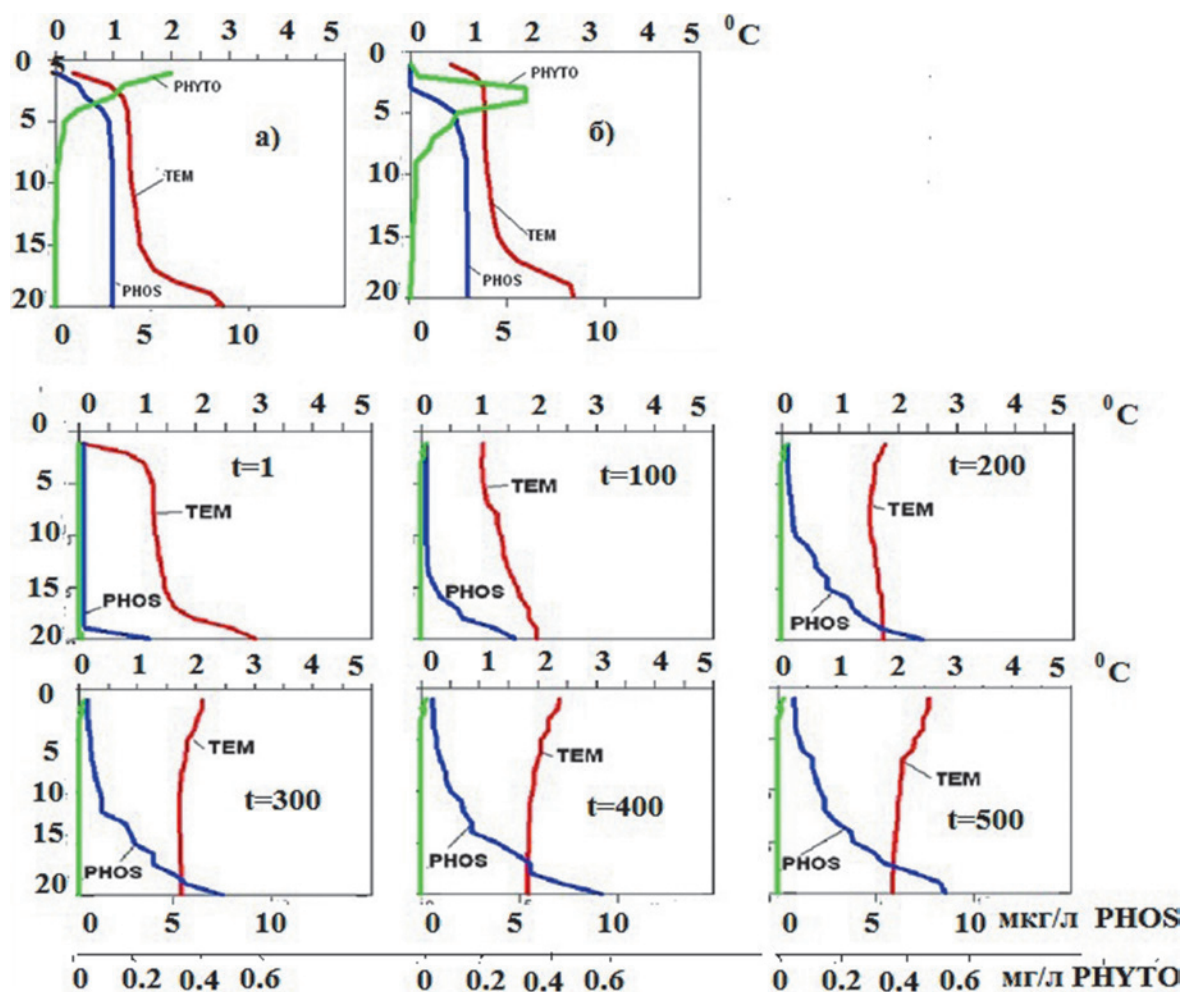


Рис. 6. Динамика вертикального распределения температуры (а) и концентрации (б) неорганического фосфора

неоднородностей горизонтального распределения этих величин в координатах X и Y .

Перейдем к описанию результатов моделирования. На рисунке 6 представлена динамика вертикального распределения температуры и концентраций неорганического фосфора при отключении блока имитации развития фитопланктона. Эта серия компьютерных экспериментов преследовала цель отладки модели и уточнения значений переходных эмпирических коэффициентов. Задача имитации конкретной природной ситуации в марте 2015 г. на Онежском озере не ставилась.

На рисунке 6 представлены неоднородности поля температур воды в подледном слое воды ($z = 1$) в различные моменты времени. Характер конфигураций неоднородностей, кроме случайного распределения, что характерно для систем клеточных автоматов, не претерпевает заметных изменений во времени. В придонном слое воды (рис. 7) наблюдалась иная картина. В начальные моменты времени распределение

температуры воды над поверхностью дна было равномерным или испытывало медленные крупномасштабные изменения. По мере проникновения до дна конвективных токов от нагревающейся в верхних слоях воды масштаб неоднородностей уменьшается со временем. К достижению состояния гомотермии эта неоднородность достигает крайней степени.

На рисунке 8 представлена неоднородность поля температур воды в придонном слое воды на $z = 19$ в различные моменты времени.

На рис. 9 представлена динамика развития фитопланктона с течением времени. Обращает на себя внимание увеличение глубины максимума биомассы фитопланктона по мере прогревания водоема. Сходное явление наблюдается и на открытой воде уже после окончания периода гомотермии. Что это – природная закономерность или результат применения одной и той же формы модели, – вопрос, который можно выяснить только на основе натурных, а не модельных экспериментов.

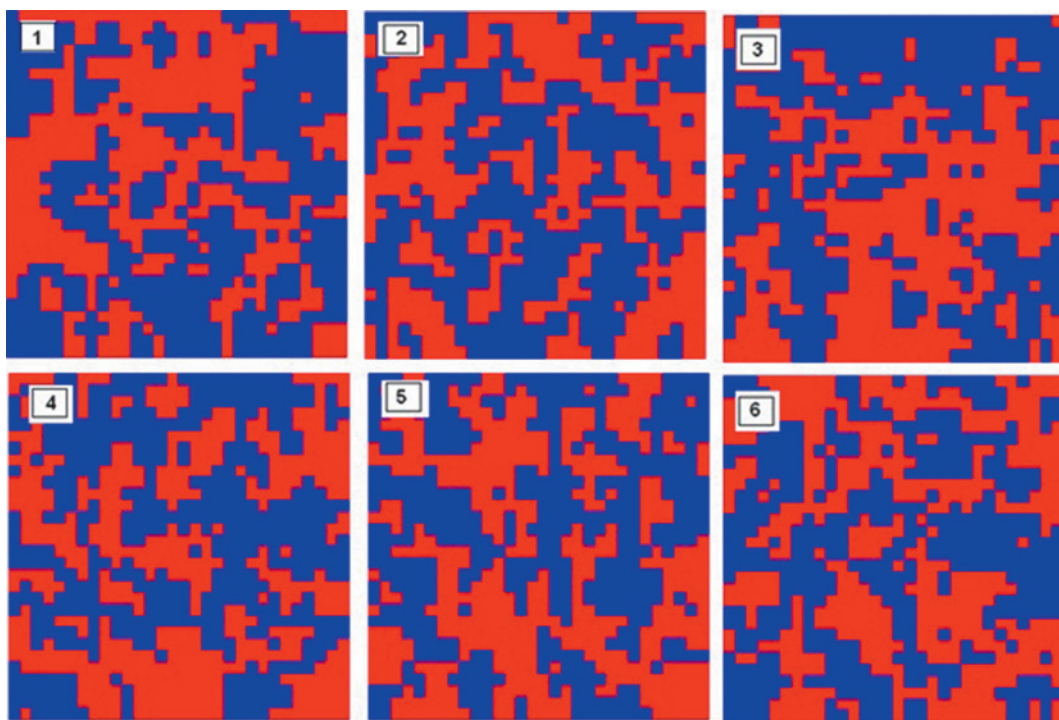


Рис. 7. Неоднородность поля температур воды в подледном слое воды ($z = 1$) в различные моменты времени (1-й шаг 34, 2-й шаг 42, 3-й шаг 85, 4-й шаг 187, 5-й шаг 415, 6-й шаг 496). Красным цветом отмечены ячейки, в которых температура воды превышает среднюю величину температуры по всей горизонтальной плоскости в данный момент времени. Синим цветом – ячейки с более низкой температурой воды

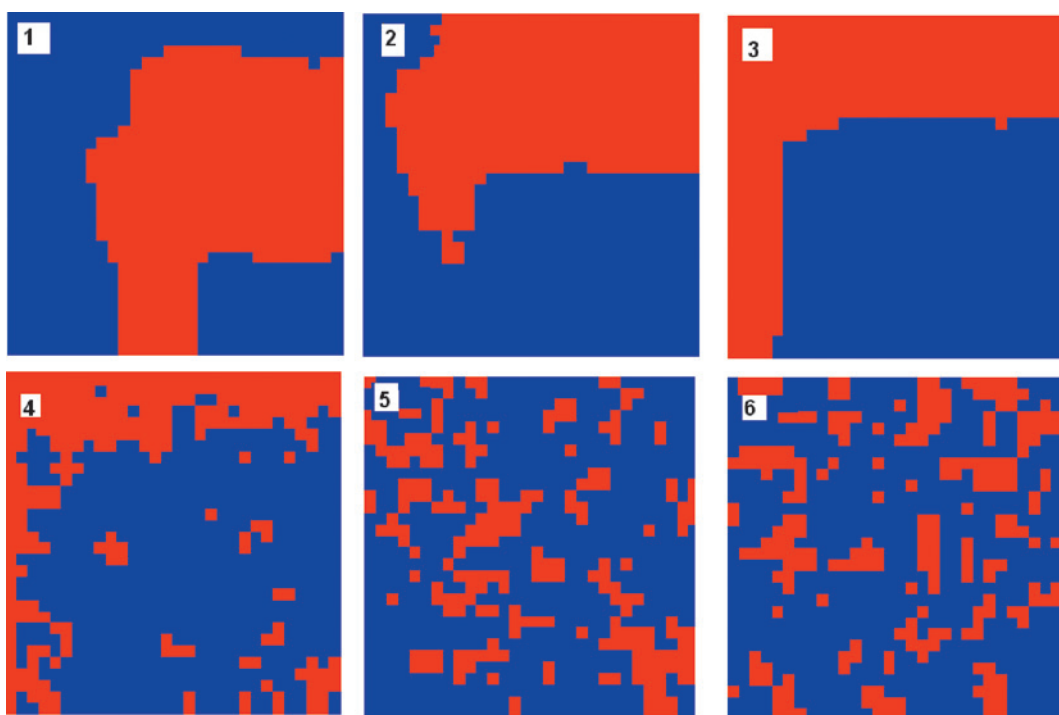


Рис. 8. Неоднородность поля температур воды в придонном слое воды ($z = 19$) в различные моменты времени (1-й шаг 34, 2-й шаг 42, 3-й шаг 85, 4-й шаг 187, 5-й шаг 415, 6-й шаг 496)

Распределение биомассы фитопланктона в горизонтальной плоскости (рис. 10), по существу, идентично распределению температуры (рис. 8), хотя и не повторяет его.

При сопоставлении данных модельного исследования и натурных измерений, полученных на Ладожском и Онежском озере в 2015 г. [Annual report..., 2015], следует принимать во

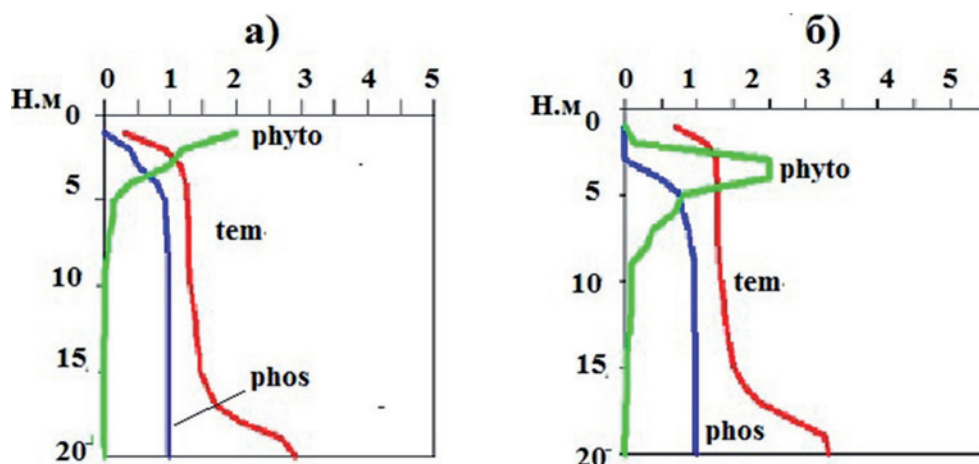


Рис. 9. Вертикальные распределения температуры (TEM), концентрации неорганического фосфора (PHOS) и фитопланктона (PHYTO) в начальный (а) и развитый (б) период прогрева подледного слоя воды

внимание принятые упрощения и допущения в интерпретации природных процессов при формировании динамики подледной экологической системы. В модели при описании термического режима подледного слоя воды учитывался только прогрев воды за счет проникающей через лед солнечной радиации. В реальности это только одна из составляющих теплового баланса в системе «атмосфера – ледяной покров – подледный слой воды». Как показали многолетние исследования на Байкале [Меншуткин, 1964; Гранин и др., 1998; Wuest et al., 2005], существенную роль в тепловом балансе играет турбулентный теплообмен с воздушной средой и испарение с верхней поверхности льда. Допущение о процессе турбулентной конвекции в виде системы одинаковых вихревых ячеек клеточными автоматами является не более чем гипотезой. Представление о иерархической структуре вихрей разного размера [Филатов, 1983] имеет право на рассмотрение, в пользу этого говорит различие масштабов неоднородностей поля температур, полученное при исследовании данной модели (рис. 8 и 10).

В рассматриваемой модели не учитывается влияние на функционирование экосистемы постоянных подледных течений, наличие которых, во всяком случае на Байкале, не вызывает сомнений [Жданов и др., 2002], а в Ладожском и Онежском озерах такие течения зимой очень слабые, менее 2 см/с [Филатов, 1983; Annual report..., 2015]. Градиент скорости течения может существенно повлиять на оценку перемешивания. Игнорирование в модели суточных колебаний подводной освещенности и тепловых потоков при относительно коротком временном шаге также могут привести

к определенным искажениям, которые желательно учесть в дальнейшем развитии модели при наличии новых экспериментальных данных и более совершенной сеточной области.

Выводы

Модель динамики экосистемы подо льдом крупного озера с использованием клеточных автоматов дает возможность описать синергетику процессов в сложной экосистеме озера. Позволяет учитывать пространственные неоднородности, процессы перемешивания, подледной конвекции, локальные особенности происходящих подо льдом процессов, характерные для такого крупного озера, как

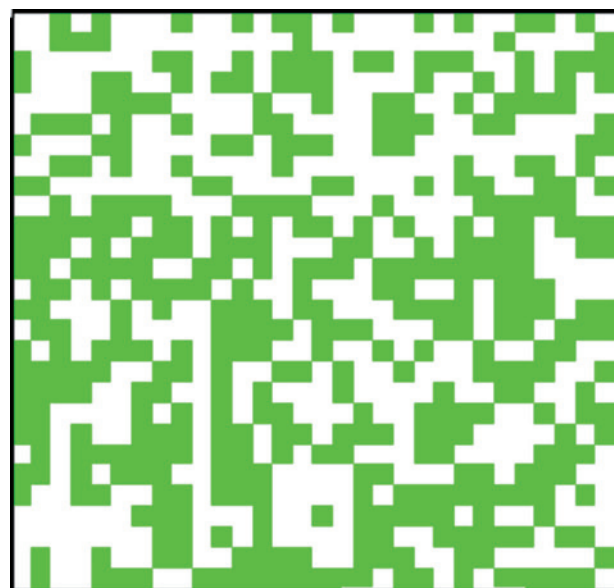


Рис. 10. Неоднородность распределения биомассы фитопланктона в подледном слое воды

Онежское, описание которых было получено по результатам комплексных экспериментов подо льдом, проведенных на Онежском озере в 2015 г.

Экспериментальные исследования на озерах выполнены в рамках российско-швейцарского проекта «Ладожское озеро: жизнь подо льдом – взаимодействие процессов подо льдом в результате глобальных изменений» за счет гранта, предоставленного фондом ELEMО (Лозанна, Швейцария), а моделирование экосистемы озера – за счет гранта РНФ № 14-17-00740.

Литература

- Астафьев Г. Б., Короновский А. А., Хромов А. Г. Клеточные автоматы. Саратов: Саратовский ун-т, 2003. 24 с.
- Афанасьев И. В. Клеточно-автоматная модель динамики численности организмов озера Байкал // Прикладная дискретная математика. 2012. № 1. С. 261–267.
- Гранин Н. Г., Гнатовский Р. Ю., Жданов А. А. и др. Конвекция и перемешивание подо льдом озера Байкал // Сибирский экологический журнал. 1998. № 6. С. 597–600.
- Жданов А. А., Гранин Н. Г., Шимараев М. Н. Подледные течения Байкала на основе новых экспериментальных данных // География и природные ресурсы. 2002. № 3. С. 79–83.
- Митрофанова Е. Ю., Кириллов В. В., Котовщиков А. В. Подледный фитопланктон глубокого олиготрофного озера // Ползуновский вестник. 2006. № 2. С. 327–333.
- Меншуткин В. В. Имитационное моделирование водных экологических систем. СПб.: Наука, 1993. 156 с.
- Меншуткин В. В. Гидрология подледного слоя воды в Байкале // Элементы гидрометеорологического режима озера Байкал // Труды ЛИН. 1964. Т. 5 (25). С. 52–63.
- Меншуткин В. В. Теплообмен через ледяной покров Южного Байкала // Элементы гидрометеорологического режима озера Байкал // Труды ЛИН. 1964. Т. 5 (25). С. 64–81.
- Меншуткин В. В., Руховец Л. А., Филатов Н. Н. Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор) 2. Модели экосистем пресноводных озер // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 1. С. 24–38.
- Монин А. С., Озмидов Р. В. Океанская турбулентность. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 319 с.
- Petrova N. A. Seasonality of Melosira-plankton of the great northern lakes. Hydrobiologia 138: 1986. P. 65–73.
- Тоффоли Е., Марголюс Н. Машины клеточных автоматов. М.: Мир, 1991. 283 с.
- Филатов Н. Н. Динамика озер. М.: Гидрометеиздат, 1983. 191 с.
- Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. 406 с.
- Annual report of Russian-Swiss multi-disciplinary project. Lausanne; Petrozavodsk. 2015. 143 p.
- Assel R. A. NOAA Atlas. An Electronic Atlas of Great Lakes Ice Cover, Winters: 1973–2002. Great Lakes Environmental Research Lab., Ann Arbor, MI. (2003a). URL: <http://www.glerl.noaa.gov/data/ice/atlas/> (дата обращения: 06.03.2016).
- Bondarenko N. A., Belykh O. I., Golobokova L. P. et al. Stratified Distribution of Nutrients and Extremophile Biota within Freshwater Ice Covering the Surface of Lake Baikal // The Journal of Microbiology. 2012. Vol. 50, no. 1. P. 8–16. doi: 10.1007/s12275-012-1251-1
- Chua L. O. CNN: A Paradigm for Complexity. Berkeley: World Scientific Series on Nonlinear Science. University of California, 1998. 320 p.
- Kirillin G., Lepparanta M., Terzhevik A. et al. Physics of seasonally ice-covered lakes, a revive // Aquatic Science. 2012. No. 74. P. 659–682.
- McKay M., Beall B., Bullerjahn G., Woityra W. Winter limnology on the Great Lakes: The role of the U. S. Coast Guard // Journal of Great Lakes Research 37. 2011. P. 207–210.
- Patten B. Environs: realistic environment particles in ecology // American Naturalist. 1982. Vol. 119. P. 179–219.
- Lake Ladoga: life under ice – Interplay of under-ice processes by global change. Annual report of Russian-Swiss multi-disciplinary project. Lausanne; Petrozavodsk. 2015. 143 p.
- Rozmarynowycz M. J. Spatio-temporal distribution of microbial communities in the Laurentian Great Lakes. A Dissertation Submitted to the Graduate College of Bowling Green State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of philosophy. December 2014. 168 p.
- Rukhovets L., Filatov N. Ladoga and Onego Great European Lakes, observations and modeling. Springer-Praxis, 2010. 302 p.
- Surter B., Finstad A. G., Helland I. P. et al. The role of winter phenology in shaping the ecology of freshwater fish and their sensitivities to climate change // Aquatic Science. 2012. No. 74. P. 637–657. doi: 10.1007/s00027-012-0274
- Terzhevik A. Proceedings 4th European Large Lakes Symposium – Ecosystem Services and Management in a Changing World. Joensuu, Finland. August 24–28, 2015.
- Wolfram S. A new kind of science. USA: Wolfram Media Inc., 2002. 1197 p.
- Wuest A., Rawens T. M., Granin N. G. et al. Cold intrusion in Lake Baikal: direct observational evidence for deep-water renewal // Limnol. Oceanogr. Vol. 50 (1). 2005. P. 184–187.
- Zdorovenov R., Zdorovenova G., Terzhevik A. et al. Under Ice convection – from small-scale physical processes to large-scale biological implications. In: Lake Ladoga: life under ice – Interplay of under-ice processes by global change. Annual report of Russian-Swiss multi-disciplinary project. Lausanne-Petrozavodsk. 2015. 143 p.

Поступила в редакцию 11.03.2016

References

- Afanas'ev I. V. Kletochno-avtomatnaya model' dinamiki chislennosti organizmov ozera Baikal [A cellular automata model for the dynamics of organisms population in Baikal]. *Prikladnaya diskretnaya matematika [Applied discrete mathematics]*. 2012. No. 1. P. 261–267.
- Asta'ev G. B., Koronovskii A. A., Khromov A. G. Kletochnye avtomaty [Cellular automata]. Saratov: Saratovskii un-t, 2003. 24 p.
- Granin N. G., Gnatovskii R. Yu., Zhdanov A. A., Tsekhonovskii V. V., Gorbunova L. A. Konvektsiya i peremeshivanie podo l'dom ozera Baikal [Convection and mixing under the ice of Lake Baikal]. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal [Siberian ecological journal]*. 1998. No. 6. P. 597–600.
- Filatov N. N. Dinamika ozer [Lake dynamics]. Moscow: Gidrometeoizdat, 1983. 191 p.
- Khaken G. Sinergetika [Synergetics]. Moscow: Mir, 1980. 406 p.
- Menshutkin V. V. Imitatsionnoe modelirovanie vodnykh ekologicheskikh system [Simulation of aquatic ecosystems]. St. Petersburg: Nauka, 1993. 156 p.
- Menshutkin V. V. Gidrologiya podlednogo sloya vody v Baikale. Elementy gidrometeorologicheskogo rezhima ozera Baikal [Hydrology of subglacial water layer in Lake Baikal. Elements of the hydrometeorological regime of Lake Baikal]. *Trudy LIN [Proc. LIN]*. 1964. Vol. 5 (25). P. 52–63.
- Menshutkin V. V. Teploobmen cherez ledyani pokrov Yuzhnogo Baikala. Elementy gidrometeorologicheskogo rezhima ozera Baikal [The heat exchange through ice cover of Southern Baikal. Elements of the hydrometeorological regime of Lake Baikal]. *Trudy LIN [Proc. LIN]*. 1964. Vol. 5 (25). P. 64–81.
- Menshutkin V. V., Rukhovets L. A., Filatov N. N. Modelirovanie ekosistem presnovodnykh ozer (obzor) 2. Modeli ekosistem presnovodnykh ozer [Ecosystem modeling of freshwater lakes (review): 2. Models of freshwater lake's ecosystem]. *Vodnye resursy [Water resources]*. 2014. Vol. 41, no. 1. P. 24–38.
- Mitrofanova E. Yu., Kirillov V. V., Kotovshchikov A. V. Podlednyi fitoplankton glubokogo oligotrofnogo ozera [Under-ice phytoplankton of a deep oligotrophic lake]. *Polzunovskii vestnik [Polzunovsky vestnik]*. 2006. No. 2. P. 327–333.
- Petrova N. A. Seasonality of Melosira-plankton of the great northern lakes. *Hydrobiologia* 138: 1986. P. 65–73.
- Toffoli E., Margolus N. Mashiny kletochnykh avtomatov [Cellular automata machines]. Moscow: Mir, 1991. 283 p.
- Zhdanov A. A., Granin N. G., Shimaraev M. N. Podlednye techeniya Baikala na osnove novykh eksperimental'nykh dannyykh [Under-ice currents of Lake Baikal (based on the new experimental data)]. *Geografiya i prirodnye resursy [Geography and natural resources]*. 2002. No. 3. P. 79–83.
- Annual report of Russian-Swiss multi-disciplinary project. Lausanne-Petrozavodsk. 2015. 143 p.
- Assel R. A. NOAA Atlas. An Electronic Atlas of Great Lakes Ice Cover, Winters: 1973–2002. Great Lakes Environmental Research Lab., Ann Arbor, MI. (2003a). URL: <http://www.glerl.noaa.gov/data/ice/atlas/> (accessed: 06.03.2016).
- Bondarenko N. A., Belykh O. I., Golobokova L. P., Artemyeva O. V., Logacheva N. F., Tikhonova I. V., Lipko I. A., Kostornova T. Ya., Parfenova V. V., Khodzher T. V., Tae-Seok Ahn, Young-Gun Zo. Stratified Distribution of Nutrients and Extremophile Biota within Freshwater Ice Covering the Surface of Lake Baikal. *The Journal of Microbiology*. 2012. Vol. 50, no. 1. P. 8–16. doi: 10.1007/s12275-012-1251-1
- Chua L. O. CNN: A Paradigm for Complexity. Berkeley: World Scientific Series on Nonlinear Science. University of California, 1998. 320 p.
- Kirillin G., Lepparanta M., Terzhevik A., Granin N., Bernhard J., Engelhoart C., Efremova T., Golosov S., Palshin N., Sherstyankin P., Zdorovenova T., Zdorovenov R. Physics of seasonally ice-covered lakes, a review. *Aquatic Science*. 2012. No. 74. P. 659–682.
- McKay M., Beall B., Bullerjahn G., Woityra W. Winter limnology on the Great Lakes: The role of the U. S. Coast Guard. *Journal of Great Lakes Research* 37. 2011. P. 207–210.
- Patten B. Environs: realistic environment particles in ecology. *American Naturalist*. 1982. Vol. 119. P. 179–219.
- Lake Ladoga: life under ice – Interplay of under-ice processes by global change. Annual report of Russian-Swiss multi-disciplinary project Lausanne-Petrozavodsk. 2015. 143 p.
- Rozmarynowycz M. J. Spatio-temporal distribution of microbial communities in the Laurentian Great Lakes. A Dissertation Submitted to the Graduate College of Bowling Green State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of philosophy. December 2014. 168 p.
- Rukhovets L., Filatov N. Ladoga and Onego Great European Lakes, observations and modeling. *Springer-Praxis*, 2010. 302 p.
- Surter B., Finstad A. G., Helland I. P., Zweimuller I., Holker F. The role of winter phenology in shaping the ecology of freshwater fish and their sensitivities to climate change. *Aquatic Science*. 2012. No. 74. P. 637–657. doi: 10.1007/s00027-012-0274
- Terzhevik A. Proceedings. 4th European Large Lakes Symposium – Ecosystem Services and Management in a Changing World. Joensuu, Finland. August 24–28, 2015.
- Wolfram S. A new kind of science. USA: Wolfram Media Inc., 2002. 1197 p.
- Wuest A., Rawens T. M., Granin N. G. et al. Cold intrusion in Lake Baikal: direct observational evidence for deep-water renewal. *Limnol. Oceanogr.* Vol. 50 (1). 2005. P. 184–187.
- Zdorovenov R., Zdorovenova G., Terzhevik A., Bouffard D., Wuest A. Under Ice convection – from small-scale physical processes to large-scale biological implications. In Lake Ladoga: life under ice – Interplay of under-ice processes by global change. Annual report of Russian-Swiss multi-disciplinary project. Lausanne-Petrozavodsk. 2015. 143 p.

Received March 11, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Меншуткин Владимир Васильевич

главный научный сотрудник, д. б. н., проф.
Санкт-Петербургский экономико-математический
институт РАН
ул. Сызранская, 28–1, Санкт-Петербург, Россия, 191187
эл. почта: menshutkina.n@gmail.com

Филатов Николай Николаевич

главный научный сотрудник лаб. географии и гидрологии,
чл.-корр. РАН, д. г. н., проф.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: nfilatov@rambler.ru

CONTRIBUTORS:

Menshutkin, Vladimir

St. Petersburg Institute for Economics and Mathematics,
Russian Academy of Sciences
28–1 Syzranskaya St., 191187 St. Petersburg, Russia
e-mail: menshutkina.n@gmail.com

Filatov, Nikolai

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

ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЯ

УДК 561.261:551.312 (470.22)

ДИАТОМОВЫЕ ВОДОРΟΣЛИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕР ЗАОНЕЖЬЯ: ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОЗЕР, РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

Т. С. Шелехова¹, Д. А. Субетто²

¹ Институт геологии Карельского научного центра РАН

² Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Представлены новые данные, полученные в результате изучения состава диатомовых комплексов поверхностных донных отложений из восьми озер Заонежья, расположенных на различных абсолютных отметках над уровнем моря. Выявлены условия развития диатомовой флоры, реконструированы минерализация воды в водоемах, кислотность среды, тенденции климатических изменений в современную эпоху. Установлена прямая зависимость минерализации воды в озерах от пород кристаллического фундамента и состава четвертичных отложений, размеров и глубины водоемов, расположения их в зонах разломов. Диатомовые комплексы водоемов свидетельствуют о направленном тренде к потеплению климата, что проявляется в снижении или даже исчезновении арктоальпийских форм, расширении спектра бореальных и космополитов. На основе выделения доминирующих видов установлены сходства и различия в развитии водоемов, получены предварительные результаты о времени их отделения от Онежского приледникового озера (ОПО), показано изменение его уровня в позднеледниковье и голоцене.

К л ю ч е в ы е с л о в а: донные отложения; диатомовый анализ; Заонежье; Онежское приледниковое озеро; позднеледниковье; голоцен.

T. S. Shelekhova, D. A. Subetto. DIATOMS IN THE BOTTOM SEDIMENTS OF ZAONEZHYE LAKES: ASSESSMENT OF THE PRESENT STATE OF THE LAKES AND RECONSTRUCTION OF LAKE ONEGO LEVEL VARIATIONS

New data, obtained by studying the composition of the diatom complexes in the top-core sediments from eight lakes in Zaonezhye located at different absolute altitudes above sea level, are reported. The evolutionary conditions for the diatom flora were assessed, and the water mineralization of the lakes, acidity of the medium and climatic variation trends in the modern era were reconstructed. The water mineralization of the lakes was found to be directly related to the type of the crystalline bedrock, the composition of Quaternary deposits, the size and depth of the lakes, and their position in fault zones. The diatom complexes evidence a directed climatic warming trend indicated by a decline or even

vanishing of arctalpine forms and a greater variety of boreal forms and cosopolites. Dominant species were identified to reveal similarities and differences in the evolution of the lakes, preliminary conclusions regarding the timing of their detachment from the periglacial Lake Onega (PLO) were drawn, and variations in its water level in the Late Glacial and the Holocene are shown.

Keywords: bottom sediments; diatom analysis; Zaonezhye; periglacial Lake Onega; Late Glacial; Holocene.

Введение

Донные отложения озер являются важным источником информации о процессах, происходящих на водосборах. Содержащиеся в отложениях створки диатомовых водорослей позволяют оценить современное состояние водоемов, реконструировать этапы их развития. По составу экологических групп диатомей восстанавливаются процессы, указывающие на выщелачивание подстилающих пород или поступление гуминовых кислот, по которым можно судить

о колебаниях pH среды. В комплексе с этими показателями структура видов по географическому распространению дает возможность получить дополнительные сведения о климатических условиях, в которых развивались диатомовые водоросли. Наконец, по структуре экологических сообществ диатомей прослеживаются колебания уровней водоемов, свидетельствующие об увлажненности климата. Таким образом, весь комплекс характеристик диатомовой флоры позволяет восстановить эволюцию природных условий на определенной территории.

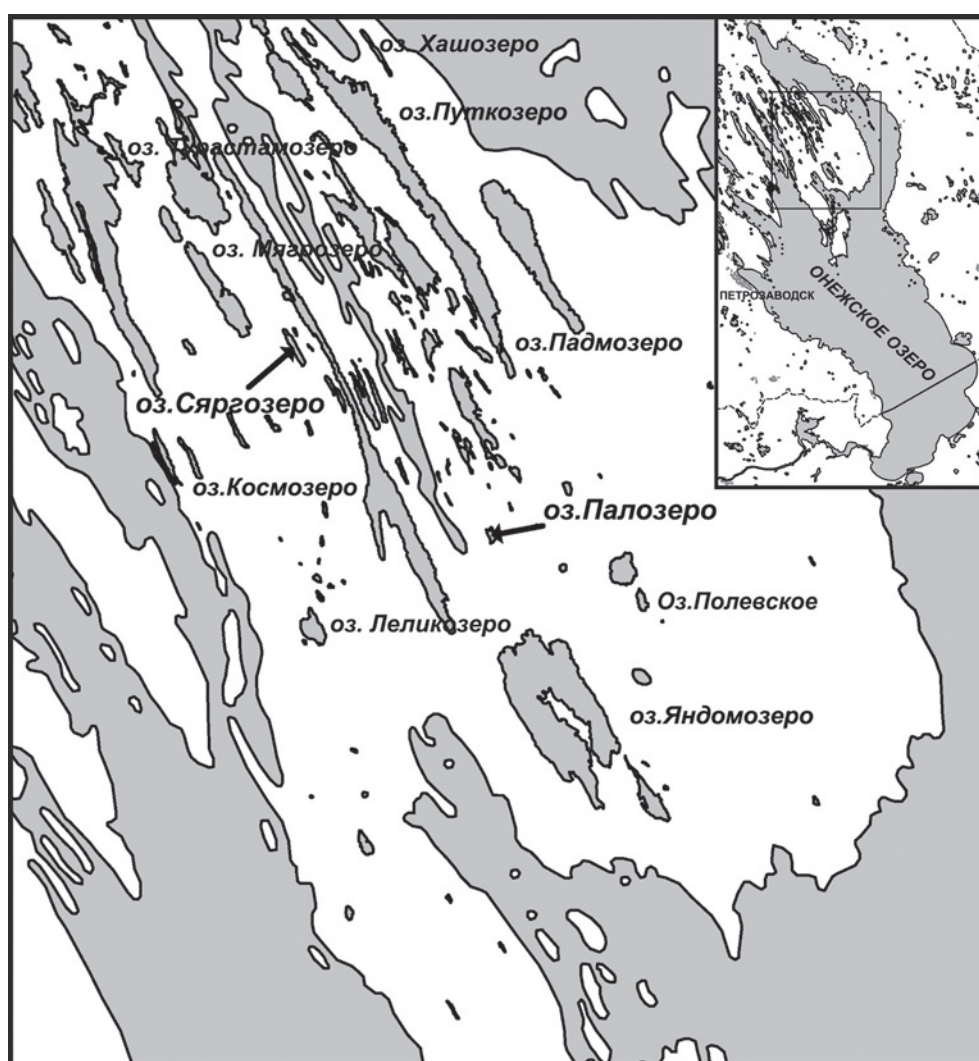


Рис. 1. Географическое положение изученных озер

Таблица 1. Природные особенности исследованных озер

Характеристики озер		Палозеро	Сяргозеро	Турастамозеро	Хашозеро	Полевское	Леликозеро	Яндомозеро	Мягрозеро
Абс. отметка уровня воды, м н. у. м. (БС)	широта, ° с. ш.	132,4	48,4	44,7	36,0	54,7	86,4	42,2	63,2
	долгота, ° в. д.	62°20'51"	62°26'49"	62°34'	62°36'	62°19'	62°18'13"	62°16'37"	62°30'44"
Координаты географического центра		35°07'12"	34°54'32"	34°40'	35°01'	35°17'	34°55'15"	35°09'49"	34°46'35"
Площадь водной поверхности, км ²		0,261	0,645	1,519	0,128	0,45	1,608	30,7	4,9
Длина береговой линии, км		2,65	5,0	4,8	7,0	3,08	4,2?	44,4	12,4
Объем, млн м ³		1,35	1,49						
Длина озера, км		0,93	2,35	2,0	3,2	1,28	2,2	10,9	6,4
	средняя	0,28	0,27		0,35	0,35		4,3	
	наибольшая	0,44	0,35	0,6	0,53	0,53	1,4		1,2
Глубина, м	средняя	5,1	2,3	1,5 0,4 (отбора пробы)	1,3	3,2		4,3	5,6
	наибольшая	17,0	5,3	3,0	3,2			(6,0-ИВП) 8,0	9,9
Максимальная прозрачность воды, м		2,0	2,7	~2,5	~2,0				
Тип котловины (генезис)		Тектоническая (с ледниковой обработкой)							
Тип проточности		проточное	бессточное*	проточное	проточное	проточное			

Примечание. * Без видимого поверхностного стока.

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
30	A.	<i>granulata</i>		Sim.	п	и	alkf	к	8,8	12,4	33,2			0,4		
31	A.	<i>granulata</i>	<i>var. angustissima</i>	(Grun.) O. Müll.	п	и	alkf	к			0,8	0,4				0,4
32	A.	<i>islandica</i>		O. Müll.	п	и	ind	а			5,2		0,2			2,8
33	A.	<i>italica</i>		Kütz.	п	и	alkf	к	9,2	7,6						
34	A.	<i>italica</i>	<i>var. valida</i>	(Grunow) Simonsen	п	и	и	а						1,2		
35	Caloneis	<i>bacillum</i>		Grunow	д	и	alkf	б				0,2	1			
36	C.	<i>obtusa</i>		(W/Sm.) Cl.	д	и	acf	а								
37	C.	<i>silicula</i>		(Ehren.) Cl.	д	и	alkf	б	0,4	0,4	0,4		0,2			0,4
38	C.	<i>silicula</i>	<i>v. truncatula</i>	Grun.	д	и	alkf	к				0,2				
39	Cocconeis	<i>diminuta</i>		(Pant.) Scheshukova	о	и	alkf	б		0,4						
40	C.	<i>placentula</i>		Ehrenberg	о	и	alkf	б					20,8			0,4
41	Cyclotella	<i>comta</i>		Kütz.	п	и	alkf	к	1,2	1,2	1,6	11,8		0,2	11,8	2,0
42	C.	<i>distinquenda</i>		Hustedt	п	и			0,4							
43	C.	<i>kuetzingiana</i>		Twaites	п	гл			4,0			1,2				0,4
44	C.	<i>kuetzingiana</i>	<i>var. schumanii</i>	Grunow	п	гл	alkf	б				2,6	0,2			
45	C.	<i>meneghingiana</i>		Kütz.	п	гл	ind	к		0,4	0,8					
46	C.	<i>ocellata</i>		Pantochek	п	и	и	б						17,6		0,4
47	C.	<i>stelligera</i>		Cl. et Grun.	п	и	alkf	к		0,4			0,2			4,8
48	<i>Cymatopleura</i>	<i>elliptica</i>	<i>var. nobilis</i>	(Hantz.) Hust.	д	и	alkf	б				0,2				
49	C.	<i>solea</i>		(Brébisson) W. Smith	д	и	анк	к							0,6	
50	C.	<i>sp.</i>			д	и			0,4						0,2	
51	<i>Cymbella</i>	<i>aequalis</i>		W. Sm.	о	и	ind	б				0,4				
52	C.	<i>angustata</i>		(W. Sm.) Cl.	о	и	acf	б	0,4			15,0		0,8		
53	C.	<i>aspera</i>		(Ehren.) Cl.	о	и	alkf	а			0,4	0,2				
54	C.	<i>cesatii</i>		(Rabench) Grun	о	и	ind	к				5,8	0,2			0,4
55	C.	<i>cistula</i>		(Hemp) Grun.	о	и	alkf	б				0,2				
56	C.	<i>cuspidata</i>		Kütz.	о	и	alkf	б			0,4	0,2	0,2			0,8
57	C.	<i>cymbiformis</i>		(Ag, Kutz) V. H.	о	и	alkf	б				0,6				
58	C.	<i>ehrenbergii</i>		Kützing	о	и	анк	б							0,6	
59	C.	<i>gaeumanii</i>		Meist.	о	и	ац	а						0,8		
60	C.	<i>gracilis</i>		(Rabench.) Cleve	о	гб (и)	ind	а (б)				0,6	0,2	2,0		
61	C.	<i>hebridea</i>		(Gregory) Grunow	о	и	acf	а (б)				0,4		0,2		0,4
62	C.	<i>helvetica</i>		(Kutz)	о	и	alkb	б				1,0				
63	C.	<i>hustedtii</i>		Krasske	о	и	иикп	б				0,4				
64	C.	<i>inserta</i>		Grun.	о	и	acf	а				0,2				

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
65	C.	<i>laevis</i>		Naeg.	o	и	ind;	a				1,2			0,4	
66	C.	<i>lapponica</i>		Grunov	o	и	ind	a				0,2				
67	C.	<i>naviculiformis</i>		Auersw.	o	и	и	б						0,2		
68	C.	<i>sinuata</i>		Gregory	o	гл	анк	б								0,4
69	C.	<i>sp.</i>		Ehrenberg	o										0,2	
70	C.	<i>turgida</i>		(W.) Greg.	o	и	alkf	к				0,2	0,2		0,2	0,4
71	C.	<i>ventricosa</i>		Kutz	o	и	ind	к				0,2			1,8	
72	Denticula	<i>kuetzingiana</i>		Kutz	д; o	и	alkf	к				0,4				
73	D.	<i>sp.</i>			o	и	alkf	к				1,8				
74	D.	<i>thermalis</i>		Kutz.	o	и	alkf	к					0,2			
75	<i>Diploneis</i>	<i>elliptica</i>		(Kütz.) Cl.	д	и	alkf	к					0,2			0,4
76	D.	<i>finnica</i>		(Ehren.) Cl.	д	и	ind	с		0,4						0,8
77	D.	<i>ovalis</i>		(Hilse) Cl.	д	гл	alkf	б		0,4	0,4					0,4
78	D.	<i>parma</i>		Cleve	д	и	и	а								0,8
79	Epithemia	<i>müllery</i>		Fricke	o	и	alkf		0,8	0,4			0,8			
80	E.	<i>sorex</i>		Kütz.	o	гл	alkb	б				0,6	1,2			
81	E.	<i>sp.</i>			o							0,4				
82	E.	<i>turgida</i>		(Ehren.) Kütz.	o	гл	alkf	б					1,2			
83	E.	<i>zebra</i>	<i>var. saxonica</i>	(Kütz.) Grun.	o	и	alkf	к			0,8	0,4	3,0			1,2
84	E.	<i>zebra</i>		(Ehren.) Kütz.	o	и	alkf	к				0,2	4,8			0,8
85	E.	<i>zebra</i>	<i>v. angulatus</i>	Tynni	o	и	alkf	к					0,2			
86	Eucocconeis	<i>flexella</i>		Kutz.	o	и	alkf	а				0,6				0,4
87	E.	<i>flexella</i>	<i>v. alpestris</i>	Brun	o	и	alkf	а				2,6				
88	<i>Eunotia</i>	<i>argus</i>	<i>v. fallax</i>	Grun	o	и	ind	к				0,2				
89	E.	<i>exigua</i>	<i>var. bidens</i>	(Breb.) Rabenhorst	o	и	ац	к						0,2		
90	E.	<i>faba</i>		Ehren.	o	гб	ац	б						0,4		
91	E.	<i>flexuosa</i>		(Breb.) Kütz.	o	и	ац	к						0,2		
92	E.	<i>formica</i>		Ehren.	o	и	acf	к		0,4						
93	E.	<i>lunaris</i>		(Ehren.) Grun.	o	и	ind	к	0,4							
94	E.	<i>pectinales</i>		(Dillw.) Rabenh.	o	и	acf	к		0,4		0,2				
95	E.	<i>pectinalis</i>	<i>var. ventralis</i>	(Ehren.) Grun.	o	и	ац	к						0,4		0,4
96	E.	<i>robusta</i>	<i>v. diadema</i>	(Ehren.) Rolfs.	o	и	acf	с			0,4					1,2
97	E.	<i>robusta</i>		Ralfs	o	и	acf	а				0,8				
98	E.	<i>robusta</i>	<i>var. tetraodon</i>	(Ehren.) Ralfs	o	гб	ац	а						0,2		
99	E.	<i>sp.</i>			o		acf		0,4			0,2				

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
100	<i>E.</i>	<i>sudetica</i>		O. Müller	o	гб	ац	а						0,4		
101	<i>E.</i>	<i>tenella</i>		(Grun.) Hust.	o	гб	acb	а				0,8	0,2			
102	<i>E.</i>	<i>veneris</i>		(Kütz.) De Toni	o	и	ац	а				0,2				1,2
103	<i>Fragilaria</i>	<i>alpestris</i>		Krasske	o	и	alkf	а	0,4				0,2			
104	<i>F.</i>	<i>brevistriata</i>		Grun.	o	и	alkf	к	10,0	21,2	8,0		13,0			5,6
105	<i>F.</i>	<i>capucina</i>	<i>var. mesolepta</i>	Rabenhorst	п		ind	к					0,2			
106	<i>F.</i>	<i>construens</i>		(Ehrenb.) Grun.	o	и	alkf	к	0,4	0,8	0,4		3,0	1,0		1,2
107	<i>F.</i>	<i>construens</i>	<i>v. venter</i>	(Ehrenb.) Hust.	o	и	alkf	к	18,0	2,4			1,6		0,2	16,0
108	<i>F.</i>	<i>construens</i>	<i>v. binodis</i>	(Ehrb.) Grun.	o	и	alkf	к					0,2		1,0	3,6
109	<i>F.</i>	<i>crotonensis</i>		Kitton	п	и	alkf	к	2,0		5,2					
110	<i>F.</i>	<i>intermedia</i>		Grun.	o	и	alkf	б					0,4			0,8
111	<i>F.</i>	<i>lapponica</i>		Grun. in Van Heurck	o	и	ind	а	4,0	3,6	5,2		0,4			
112	<i>F.</i>	<i>leptostauron</i>	<i>var. dubia</i>	(Grun.) Mayer	o	гб	alkf	б					0,2			
113	<i>F.</i>	<i>pinnata</i>		Ehr.	o	гп	alkf	б		1,2			0,2			
114	<i>F.</i>	<i>virescens</i>	<i>var. subsalina</i>	Grun.	o	гп	alkf	б		0,4						1,6
115	<i>F.</i>	<i>virescens</i>		Ralfs.	o	и	ind	а					0,2			
116	<i>F.</i>	<i>sp.</i>			o	и									0,4	
117	<i>Frustulia</i>	<i>rhomboides</i>	<i>v. saxonica</i>	(Rabenb.) De Toni	д	гб	acf	а				1,0		10,0		
118	<i>Gomphonema</i>	<i>acuminatum</i>	<i>fo coronata</i>	(Ehrenb.) W. Sm.	o	и	анк	б							0,2	
119	<i>G.</i>	<i>acuminatum</i>		Ehren.	o	и	ind	б	0,4	0,4				0,6		
120	<i>G.</i>	<i>gracile</i>		Ehren.	o	и	ind	а				0,2	0,2			
121	<i>G.</i>	<i>intricatum</i>	<i>v. pumillum</i>	(Kütz.) Grun.	o	и	alkf	б				0,4				
122	<i>G.</i>	<i>parvulum</i>		(Kutz) Grun.	o	и	ind	б				0,2	0,4			
123	<i>G.</i>	<i>sp.</i>			o	и	и								0,2	
124	<i>G.</i>	<i>subtile</i>		Ehren.	o	и	ind	б				0,2				
125	<i>Gyrosigma</i>	<i>acuminatum</i>		(Kütz.) Rabench.	д	гп	alkf			0,4			0,2			2,4
126	<i>G.</i>	<i>sp.</i>			д	гп					0,4		0,6			
127	<i>Melosira</i>	<i>undulata</i>	<i>var. normanii</i>	Arn.	д	и	анк	к								0,4
128	<i>M.</i>	<i>varians</i>		Agardh	п	гп	alkf	к					9,8			
129	<i>Navicula</i>	<i>bacillum</i>		Ehren.	д	гб	alkf	к					0,4			
130	<i>N.</i>	<i>cocconeiformis</i>		Gregory	д	и	и	б								0,4
131	<i>N.</i>	<i>cryptocephala</i>		Kütz.	д	гп	alkf	к				1,6	1,2	1,2	0,6	
132	<i>N.</i>	<i>cuspidata</i>	<i>var. ambigua</i>	Kütz.	д	гп	анк	к							1,0	
133	<i>N.</i>	<i>diluviana</i>		Krasske	д	и				0,8						
134	<i>N.</i>	<i>elegans</i>		W. Sm.	д	гп-м3	анк	к								0,4

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
135	N.	<i>exigua</i>		(Greg.) O. Mull.	д	гл?	анк	к								0,4
136	N.	<i>graciloides</i>		A. Mayer.	д	и	ind	б		0,4			0,8			
137	N.	<i>jaagii</i>		Meister	д	и	ind	а				0,4				
138	N.	<i>jentzhii</i>		Grunow	д	и	alkf						0,2			
139	N.	<i>lanceolata</i>	<i>sellaphora</i>	(Ag.) Kütz.	д	и	alkf	а					0,8	0,2	2,0	0,4
140	N.	<i>menisculus</i>		Schumann	д	гл	alkf	б					0,6			
141	N.	<i>nodosa</i>		(Ehren.)	д	и	ind	а		0,4						
142	N.	<i>oppugnata</i>		Hust.	д		alkf	к					0,2			
143	N.	<i>peregrina</i>		(Ehren.) Kütz.	д	мз	alkf	к	0,4	0,4			0,2	0,2	8,4	0,2
144	N.	<i>placentula</i>	<i>f. rostrata</i>	A. Mayer	д	и	alkf	б			0,4		0,4		1,6	
145	N.	<i>placentula</i>	<i>v. placentula</i>	Ehren.	д	и	alkf	б		0,4						
146	N.	<i>pseudoscutiformis</i>		Hust.	д	и	alkf	а					0,6			
147	N.	<i>pupula</i>	<i>v. rectangularis</i>	(Greg.) Grun.	д	гл	ind	к	2,0			1,4	2,0		17,0	0,8
148	N.	<i>radiosa</i>	<i>var. subrostrata</i>	Cleve	д	и	и	б						1,4		
149	N.	<i>radiosa</i>	<i>var. tenella</i>	(Breb.) Grunov	д	гл	анк	б								0,4
150	N.	<i>radiosa</i>		Kütz.	д	и	ind	б	0,4	0,8		7,0	0,6		11,2	0,8
151	N.	<i>rhyncocephala</i>		Kütz.	д	гл	alkf	к			0,4		0,4			
152	N.	<i>scutelloides</i>		W. Smith	д	и-гл	анк	б								0,8
153	N.	<i>sp.</i>		L.-Bertalot	д	и				0,4						
154	N.	<i>subtilissima</i>		Cleve	д	неизв.	acf	к	0,4							
155	N.	<i>unipunctata</i>			д	и	alkf	к					0,2			
156	N.	<i>viridula</i>		Kütz.	д	гл	alkf	к					0,6			0,4
157	N.	<i>vulpina</i>		Kütz.	д	и	alkf	б					0,2		0,2	
158	Neidium	<i>affine</i>		(Ehren.) Cl.	д	и	ац	б							0,6	0,4
159	N.	<i>iridis</i>	<i>f. vernalis</i>	Reich	д	гб	ind	б				0,2				
160	N.	<i>iridis</i>		(Ehren.) Cl.	д	гб	alkf	б				0,2			0,6	
161	N.	<i>sp.</i>			д	гб	acf	а	0,4				0,2			
162	Nitzschia	<i>acicularis</i>		(Kütz.) W. Sm.	д-п	и	анк	б								0,4
163	N.	<i>acidoclinata</i>		Lange-Bertalot	д	и	alkf	к					0,8			
164	N.	<i>denticula</i>		Grunow	д	и, мз	alkb	б				0,2	0,2			
165	N.	<i>denticula</i>		Grunow	д	гл	анк	к							1,4	
166	N.	<i>fonticola</i>		Grunow	д	и	alkf	а	0,4	1,2						
167	N.	<i>fruticosa</i>		Hustedt	д											
168	N.	<i>geitleri</i>		Hustedt	м	мз	alkf				0,4				0,2	
169	N.	<i>kuetzingiana</i>		Hilse	п	и	alkf	к					0,8			

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
170	N.	<i>paleacea</i>		Grunow	д	и	alkf	б					0,2			
171	N.	<i>pura</i>	впервые	Hustedt	д	и	ind	а				0,2				
172	N.	<i>sosiabilis</i>		Hustedt	д	и	alkf	б					0,2			
173	N.	<i>sp.</i>		Grunow	д	гл			0,4		0,4				0,4	
174	Opephora	<i>martyi</i>		Herib.	о	и	alkf	б					0,4			
175	Pinnularia	<i>appendiculata</i>	<i>v. budensis</i>	Grun.	д	и	ind	а				0,4				
176	P.	<i>braunii</i>		Grun. Cl.	д	гб	ind	а								0,4
177	P.	<i>gibba</i>	<i>f. subundulata</i>	Mayer, Hustedt	д	и	ац	к								0,4
178	P.	<i>gibba</i>	<i>v. linearis</i>	Hust	д	и	ind	б				0,2				
179	P.	<i>gibba</i>	<i>v. parva</i>	(Ehren.) Grun.	д	и	ind	б					0,2			
180	P.	<i>gibba</i>		Ehren.	д	и	ац	б						0,6	2,6	1,6
181	P.	<i>hemiptera</i>		(Kütz.) Rabench.	д	и	acf	б	0,4		0,4					
182	P.	<i>interrupta</i>		W. Sm.	д	и	acf	б	0,4		0,4	0,2	0,4			
183	P.	<i>interrupta</i>		W. Sm.	д	и	ац	б						1,0	8,0	
184	P.	<i>leptosoma</i>		(Grun.) Cl.	д	и					0,4					
185	P.	<i>major</i>	<i>v. linearis</i>	Cleve	д	и	ind	б					0,2			
186	P.	<i>mesolepta</i>		(Ehrenberg) W. Smith	д	и	ind	б			0,4	0,2	0,2		1,2	0,4
187	P.	<i>microstauron</i>	<i>v. brebissonii</i>	(Ehren.) Cl.	д	и	ind	б	1,2						1,4	0,4
188	P.	<i>microstauron</i>			д	и	ind	б		0,4		0,2				
189	P.	<i>microstauron</i>		(Ehren.) Cl.	д	и	ind	б					0,4			
190	P.	<i>nodosa</i>		(Ehren.) W. Sm.	д	и	ind	а	1,2		0,4		0,2			1,2
191	P.	<i>platicephala</i>		(Ehren.) Cl.	д	и	ind	а				0,2				
192	P.	<i>sp.</i>		Ehrenb.	д	гб					0,4				0,4	0,4
193	P.	<i>viridis</i>		(Nitzsch.) Ehren.	д	и	acf	б			0,4					
194	Rhopalodia	<i>gibba</i>		(Ehren.) O. Müll.	о	гл	alkf	б				1,6	0,2			
195	Rh.	<i>gibba</i>	<i>v. ventricosa</i>	(Ehren.) Grun	д	и	alkf	б				0,4	0,4			
196	Roicosphaenia	<i>curvata</i>		(Kütz) Grun.	о	гл	alkf	к					2,8			
197	Stauroneis	<i>anseps</i>	<i>f. linearis</i>	(Ehren.) Cl.	д	и	ind	б	3,6						3,6	
198	S.	<i>anseps</i>		(Ehren.)	д	и	acf	к			0,4		0,2		4,8	
199	S.	<i>phoenicentiron</i>		Ehren.	д	и	ind	к	0,4			0,4			2,6	
200	S.	<i>smithi</i>		Grun.	д	и	alkf	к		0,4						
201	S.	<i>sp.</i>			д											0,8
202	Stenopterobia	<i>intermedia</i>		Lewis.	д	гл	acf	б	1,2					0,2		
203	Stephanodiscus	<i>astreae</i>	<i>var. minutula</i>	(Kütz.) Grun.	п	и	ind						4,2			
204	S.	<i>astreae</i>		(Ehren.) Grunov	п	и-гл	анк	к								2,4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
205	S.	dubius		(Fricke) Hustedt	п	и	алк	к								4,0
206	Surirella	sp.			д	гл			0,4		0,4				0,2	
207	Synedra	parasitica	v. subconstricta	Grun.	о	и	alkf	к					0,2			
208	S.	parasitica		(W. Sm.) Hust.	о	и	alkf	к				0,2				
209	S.	sp.			о		алк									0,4
210	S.	tabulata	var. acuminata	Grun	о	мз		к							0,2	
211	S.	tabulata	var. grandis	Mereschkovsky	о	мз		к							0,2	
212	S.	ulna		(Nitzsch) Grun	п	и	alkf	к				0,4				
213	Tabellaria	fenestrata		(Lyngb.) Kütz.	п	гб	acf	б	8,4		0,4	6,4	1,2	2,2	0,4	1,2
214	T.	flocculosa		(Roth.) Kütz.	о	гб	acf	б	0,4	1,6	5,6	13,4	5,4	2,6	1,2	6,8
215	Tetracyclus	lacustris	var. strumosa	(Ehren) Hustedt	о	гб	ац	б								0,4
216	T.	lacustris		Rolfs.	о	и	acf	а								0,8
	Итого створок								249	249	252	498	501	500	500	260

Примечание. п – планктонные; о – обростатели; д – донные; гл – галофилы; гб – галофилы; и – индифференты; асф – ацидофилы; алк – алкалофилы; ind – индифференты; а – арктоальпийские; б – бореальные; к – космополиты. Цифры обозначают содержание вида в %.

Целью данного исследования была реконструкция экологических обстановок вокруг водоемов во время накопления современных осадков.

Материалы и методы

Материалом для данной работы послужили результаты диатомового анализа поверхностных донных отложений из восьми озер Заонежья: Хашозеро, Турастамозеро, Мягрозеро, Леликозеро, Сяргозеро, Палозеро, Полевское, Яндомозеро, расположенных на разных абсолютных отметках над уровнем моря (н. у. м.) и в различных геолого-геоморфологических условиях (рис. 1; табл. 1).

Методом диатомового анализа было исследовано 36 образцов (из них 8 – самых верхних 1–5 см). В поверхностных отложениях выявлено 216 таксонов диатомовых водорослей, принадлежащих к 35 родам (табл. 2).

Техническая обработка проб и приготовление постоянных препаратов на диатомовый анализ выполнялись по общепринятой методике [Диатомовый анализ..., 1949; Давыдова, 1985], при идентификации флоры использовалась различная справочная литература [Диатомовые водоросли..., 1951; Molder, Tynni, 1967–73; Tynni, 1975–1980; Krammer, Lange-Bertalot, 1986; Барина и др., 2006; Генкал, Трифонова, 2009; Генкал и др., 2013].

Частично результаты исследований представлены на диатомовых диаграммах [Шелехова и др., 2015]. С использованием полученных данных проводился подсчет видов (в %) по отношению к географическому распространению – арктоальпийских, бореальных и космополитов; по галобности – мезогалобов, галофилов, индифферентов, галофилов; по отношению к pH – алкалофилов, алкалобионтов, индифферентов, ацидофилов, затем значения pH подсчитывались по [Renberg, Hellberg, 1982]. Составлен список (табл. 2) диатомовой флоры поверхностных отложений озер с характеристиками водорослей по их принадлежности к определенным экологическим группам. Наиболее интересные виды диатомей, полученные с помощью TESCAN, приведены на микрофотографиях (рис. 2). Все эколого-географические характеристики показаны на рисунке 3.

Результаты и обсуждение

В результате сравнения состава диатомовой флоры поверхностных донных отложений всех изученных озер (табл. 2) в каждом из них

Таблица 3. Диатомовые комплексы в поверхностных донных осадках озер Заонежья и изменение уровня Онежского озера

Период	Озера	Доминанты		донные	Изменение уровня Онежского озера, абс. отм., м			
		планктонные	обрастатели		По Девятова, 1986	По Елина и др., 1999	По Демидов и др., 2003	Результат по озерам
SA	Абс. отм., м н. у. м.							
SB	Хашозеро, 36,0	Melosira varians , <i>Stephanodiscus astraea</i>	<i>Cocconeis placentula</i> , <i>Fragilaria brevistriata</i> , <i>F. construens</i> , <i>Epithemia zebra</i> + var. <i>saxonica</i> , <i>Tabellaria flocculosa</i> , <i>Rhoicosphenia curvata</i>	<i>Navicula</i> spp.	37–33	37-33-32	32–33	36–33
AT	Яндомозеро, 42,2	<i>Aulacoseira granulata</i> , <i>A. ambigua</i>	<i>Fragilaria lapponica</i> , <i>F. crotonensis</i> , <i>Tabellaria flocculosa</i>		38–37	41–36	39–32	41–36
	Турастамозеро, 44,7	<i>Cyclotella comta</i> , C. kuetzingiana var. schumanii , <i>Tabellaria fenestrata</i>	<i>Cymbella angustata</i> , <i>C. cesatii</i> , <i>Eucoconeis flexella</i> v. <i>alpestris</i> , <i>Tabellaria flocculosa</i>	<i>Anomoeoneis exilis</i> , <i>Navicula radiosa</i>	47–41	45-44-41	45–36	48–41
BO	Сяргозеро, 48,4	<i>Cyclotella comta</i> , Tabellaria fenestrata	<i>Cymbella</i> spp.	<i>Navicula</i> spp., <i>Pinnularia</i> spp., <i>Stauroneis</i> spp., <i>Amphora</i> spp.	51–48	51–48	50–43	55–48
	Полевское, 54,7	<i>Aulacoseira ambigua</i> , Cyclotella comta , C. stelligera , Stephanodiscus astraea var. astraea	<i>Fragilaria brevistriata</i> , <i>F. construens</i> , <i>F. construens</i> var. <i>venter</i> , <i>F. construens</i> var. <i>binodis</i> , <i>Tabellaria flocculosa</i>					
PB	Мягрозеро, 63,2	Aulacoseira ambigua , <i>A. granulata</i> , <i>A. italica</i>	<i>Fragilaria brevistriata</i>		59–55	58–55	57–53	64–55
DR-3	Леликозеро, 86,4	<i>Aulacoseira distans</i> , <i>A. granulata</i> , <i>A. italica</i> , Cyclotella kuetzingiana	<i>Fragilaria brevistriata</i> , <i>Fragilaria construens</i> v. <i>venter</i> , <i>Fragilaria lapponica</i> , <i>Tabellaria fenestrata</i>				62	95–85
AL	Палозеро, 132,4	<i>Aulacoseira distans</i> , Cyclotella ocellata		<i>Frustulia saxonica</i>				132–95?

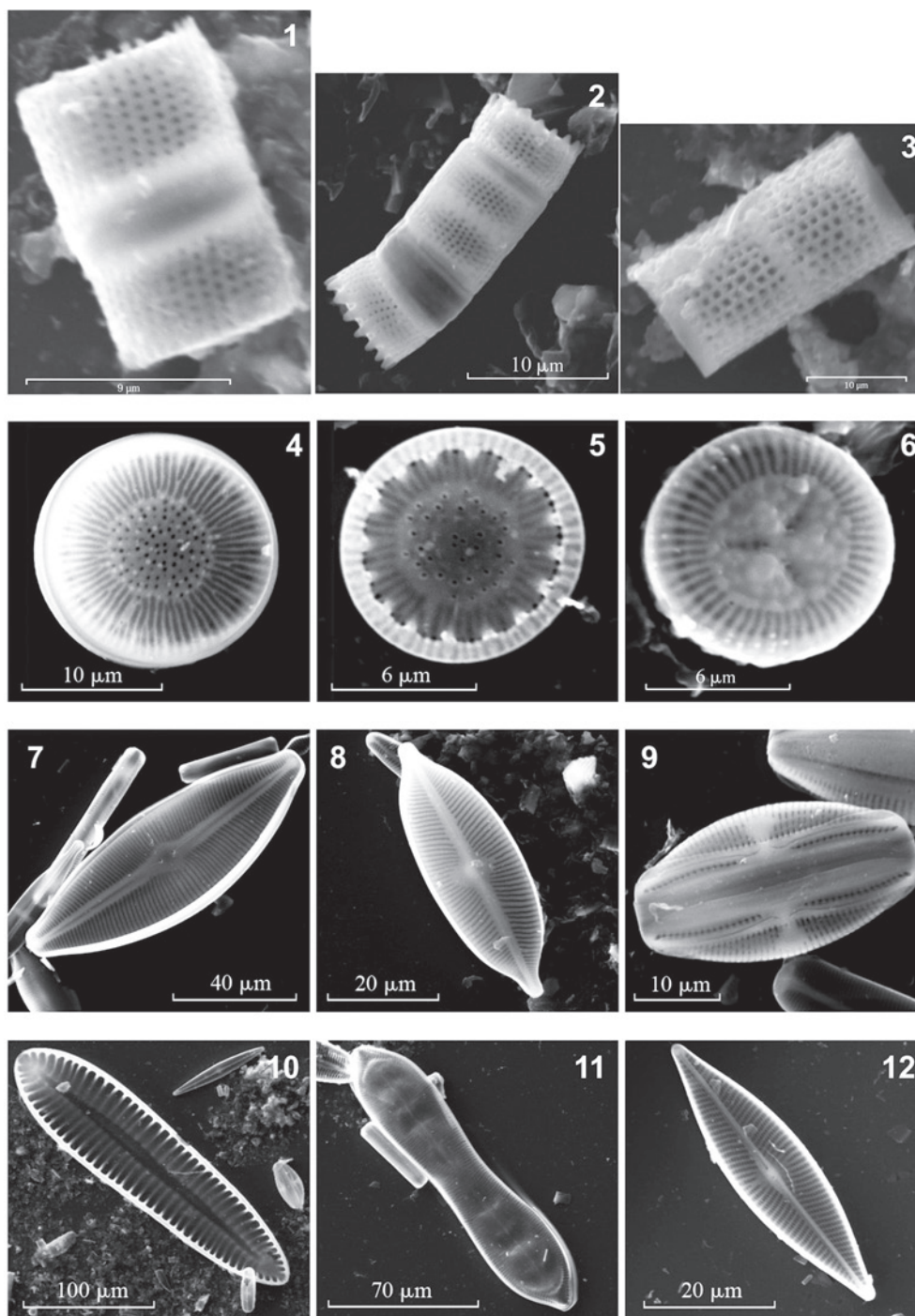


Рис. 2. Микрофотографии створок диатомовых водорослей из поверхностных донных отложений озер:

1. *Aulacoseira distans* (Мягрозеро). 2. *A. subarctica* (Палозеро). 3. *A. islandica* ssp. *helvetica* (Яндомозеро). 4. *Stephanodiscus* sp. 5. *Cyclotella* sp. 6. *C. kuetzingiana* var. *radiosa*. 7. *Cymbella ehrenbergii*. 8. *C. turgida*. 9. *Amphora ovalis*. 10. *Cymatopleura* sp. 11. *C. solea*. 12. *Navicula peregrina*. (5–12 Сяргозеро)

выделены доминирующие виды и роды диатомовых водорослей (табл. 3).

Особое внимание было обращено на планктонные доминанты. Оказалось, что на каждом последующем уровне в составе доминирующего комплекса появляется как минимум один новый (индикаторный) вид, вероятно характерный только для данного палеоклиматического

периода, что и послужило основой для определения уровней Онежского озера и уточнения времени отделения от него исследованных малых водоемов. (В таблице 3 виды-индикаторы выделены жирным курсивом). Кроме этого, время отделения исследованных водоемов от ОПО в дальнейшем может быть уточнено с помощью радиоуглеродных датировок

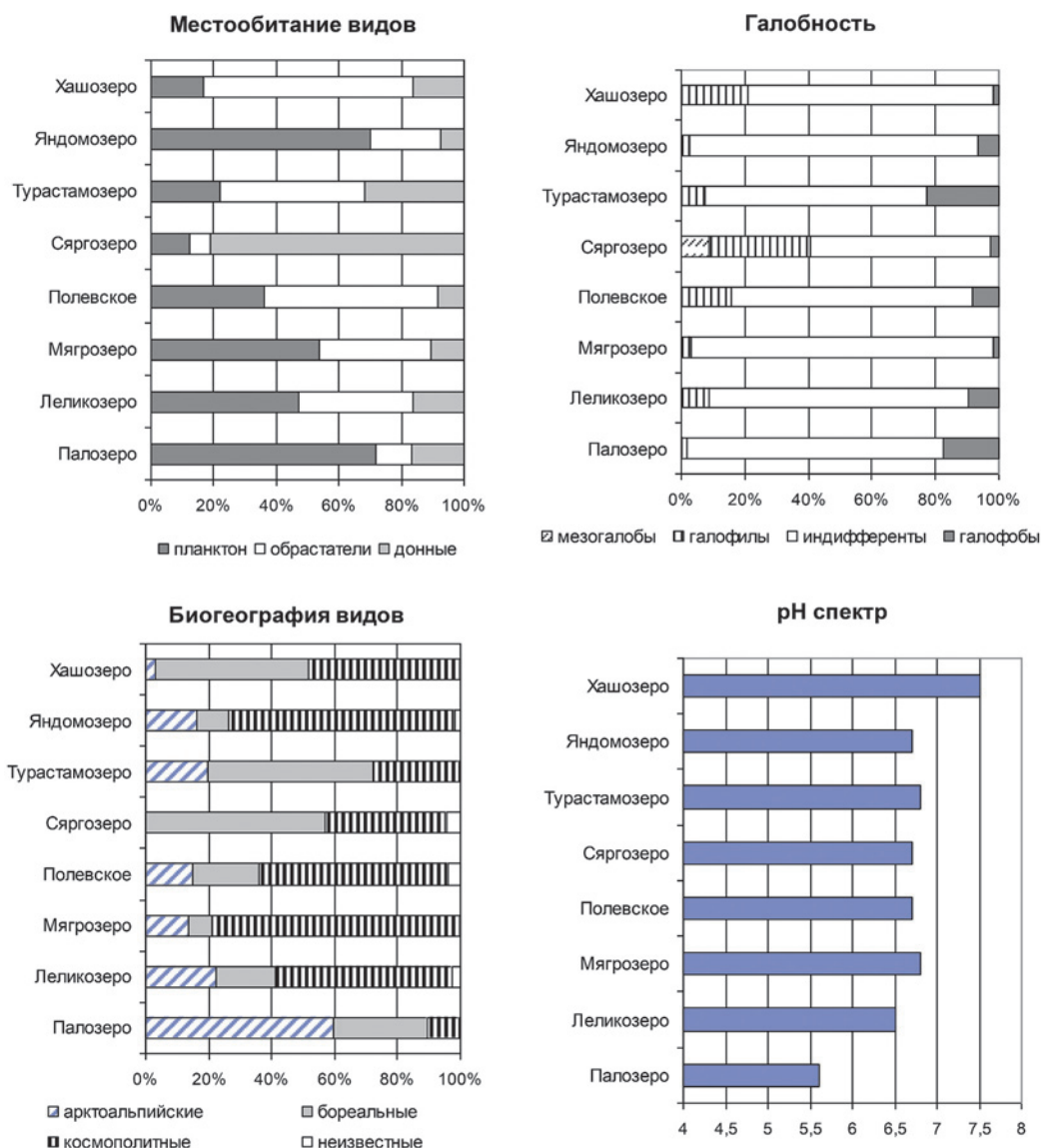


Рис. 3. Эколого-географические характеристики и pH-спектр диатомовых комплексов поверхностных донных отложений озер Занонежья

и комплексного микропалеонтологического анализа колонок донных отложений. Согласно предварительным данным, отделение озера Леликозеро могло произойти уже в позднем дриасе; Мягрозеро – в пребореале; Сяргозеро, Полевское – в бореале; Турастамозеро, Яндомозеро – в атлантическое время, Хашозеро – в суббореальное [Шелехова, 2006]. Озеро Палозеро, расположенное на самой высокой абс. отм. и имеющее своеобразный, значительно отличающийся от всех изученных озер состав диатомового комплекса, вероятно, стало самостоятельно развиваться в конце аллерада. Диатомовые комплексы озер, практически одновременно отделившихся от Онежского озера, отличаются наибольшим сходством. Эти данные уже подтверждаются по ранее изученным разрезам. Например, озеро Руоколампи (абс.

отм. 60 м) [Филимонова, Шелехова, 2005], расположенное на близких с озером Мягрозеро абс. отм., отделилось в пребореале, а болото Вожмариха – в атлантикуме-суббореале [Герман и др., 2005]. Помимо этого, можно сделать вывод о том, что многие виды диатомовой флоры, представленные в таблице 2, встречаются во всех изученных водоемах, свидетельствуя о единстве ее формирования.

Следует отметить, что сохранность створок в современных донных осадках водоемов в целом хорошая, однако в озерах Леликозеро и Мягрозеро поры многих створок диатомей «забиты» тонкопелитовым материалом, иногда корродированы, что, по-видимому, связано с условиями их захоронения. На рисунке 2 представлены микрофотографии створок некоторых диатомовых водорослей из разных

Таблица 4. Сравнительная характеристика pH и минерализации озер в зависимости от подстилающих их водосборы кристаллических пород и четвертичных отложений

Озера, абс. отм. озер, м н. у. м.	Кристаллические породы	Четвертичные отложения	pH		Минерализация	
			реконструиру- емые	измеренные	измеренные, мг/л	содержание гало- филов+ мезогалобов, %
Хашозеро 36,0	породы кондопожской свиты калевия (туффиты, алевро-пелитовые туфосланцы, шунгитсодержащие алевролиты)	сочленение морены и озерно-ледниковых песчано-алевро-глинистых отложений	7,2–7,5		-	22
Яндомозеро 42,2	шунгитовые породы с содержанием C > 20 %	ленточные глины и алевроиты ОПО	6,6	6,86–7,55	41,2	4
Турастамозеро 44,7	углеродсодержащие сланцы, алевролиты	песчаная морена	7,3–6,8	6,7–8,1	46,7	10
Сяргозеро 48,4	зона СРД – контакт углеродсодержащих сланцев, алевролитов, доломитов, известняков с габбро	морена+флювиогляциаль- ные отложения	5,9–7,0–6,6	7,3	46,06	40
Полевское 54,7	шунгитовые породы с содержанием C > 20 %	морена	6,4–6,9–6,6	7,7	47,3	18
Мягрозеро 63,2	углеродсодержащие сланцы, алевролиты (мягрозериты) + габбро	морена, флювиогляциальные отложения	6,8	7,45–8,25 (июль) 7,39–7,81 (апрель)	108,7	4
Леликозеро 86,4	контакт нерасчлененных габбродолеритов, базальтов с углеродсодержащими песчаниками, алевролитами, туфо-алевролитами, сланцами	морена	6,5	6,56–7,1	20,7–26,3	8
Палозеро 132,4	нерасчлененные габбродолериты, базальты	песчаная морена	5,4–5,6	6,36	20	2

Примечание. Измеренные значения минерализации воды и pH для озер Сяргозеро, Палозеро, Полевское представлены ИВПС.

озер. Явных признаков антропогенного воздействия на озера по данным диатомового анализа не наблюдается.

Эколого-географические характеристики диатомовой флоры поверхностных донных осадков озер

Структура диатомовых комплексов изученных озер по местообитанию, галобности, отношению к pH среды, географическому распространению приводится на рисунке 3. Структура комплексов по местообитанию четко отражает зависимость их состава от размеров и глубин водоемов. Так, самым большим является озеро Яндомозеро, в котором выявлено наиболее высокое содержание планктонных форм – около 70 %; самым глубоким – Палозеро, до 70 % планктона, затем Мягрозеро – 55 %, Леликозеро – 48 %, что свидетельствует о надежности диатомового анализа и подтверждается действительными размерами и площадью водоемов (табл. 1; рис. 3).

Соотношение видов по галобности (рис. 3) указывает на господство в водоемах индифферентных форм, а различия связаны с составом подстилающих кристаллических пород, четвертичных отложений, размерами и глубиной водоемов.

Наименее минерализовано самое глубокое озеро Палозеро (абс. отм. 132,4 м н. у. м.), расположенное в пределах развития пород кондопожской свиты калевия (туффитов, алевро-пелитовых туфосланцев, шунгитсодержащих алевролитов) [Голубев и др., 2013], перекрытых песчаной мореной. Содержание в нем галофилов в сумме с мезогалолами не превышает 1–2 %. В более мелком озере Турастамозеро (табл. 1 и 4), лежащем среди шунгитсодержащих пород, также перекрытых песчаной мореной, содержание этих видов несколько выше – до 10 %. В осадках небольшого по размерам озера Хашозеро, расположенного в пределах одноименных кристаллических пород, но на сочленении морены и озерно-ледниковых песчано-алевро-глинистых отложений, доля галофилов более высокая – 22 %; в озере Полевское (шунгитовые породы, перекрытые мореной) – 18 %. Наиболее минерализовано (содержание галофилов до 40 %) небольшое по размерам Сяргозеро, что легко можно объяснить поступлением в него различных микроэлементов из более богатых озерно-ледниковых (в том числе и ленточных) глин, а также расположением в Святухинско-Космозерской зоне складчато-разрывных дислокаций (СРД) (на контакте с породами Заонежской свиты лудиковия – шунгитсодержащими и шунгитовыми

сланцами и алевролитами, туффитами, доломитами, известняками, лидитами). Результаты диатомового анализа показали, что в озерах Турастамозеро, Сяргозеро, Полевское доля галофилов в сумме с мезогалолами по направлению к верху разреза современных осадков снижается, следовательно, снижается минерализация, вероятно, за счет возрастания поверхностного стока в результате увлажнения климата и снижения подземного питания [Шелехова, 2015]. В озерах Хашозеро и Палозеро минерализация, напротив, повышается, что может быть связано со многими причинами: составом кристаллических пород, расположением озер в зоне разломов, небольшими размерами, поступлением растворенных солей с поверхностным стоком и т. д.). Таким образом, четко прослеживается зависимость: чем больше водоем – тем меньше в нем содержание галофильных видов.

Соотношение видов по географическому распространению (рис. 3) ярко свидетельствует о том, что на их структуру оказывают влияние природно-климатические, геологические факторы и размеры водоемов. По составу диатомовой флоры установлено, что во всех озерах она развивается в достаточно холодноводных условиях, так как содержание арктоальпийских и бореальных видов (в сумме) колеблется от 40 % (Полевское, Леликозеро) до 90 % – в озере Палозеро, в остальных составляет 50–70 %. Такое содержание холодолюбивых видов характерно для озер, расположенных в северных широтах (зоне южной тайги). Высокая численность арктоальпийских видов в сумме с бореальными наблюдается в небольших водоемах, в более крупных озерах их доля значительно снижается. Однако в небольшом по размерам Мягрозере отмечается наименьшее содержание холодолюбивых форм, что, по-видимому, связано со слагающими водосбор темными, хорошо прогреваемыми шунгитсодержащими породами, а также с составом и генезисом четвертичных отложений.

В современных поверхностных отложениях всех озер сокращается доля арктоальпийских видов, а бореальных и космополитов – возрастает: в Турастамозере – с 28 до 53,8 %; в Хашозере – с 27,8 до 48,8 %, в озере Полевское – с 14 до 30 %; в Палозере – с 10 до 30 %; в Сяргозере арктоальпийские виды вообще исчезают. Причиной этому может быть потепление климата [Шелехова и др., 2015; Шелехова, 2015].

В меньшей степени размеры озер влияют на кислотные условия среды, которые зависят от строения и состава пород кристаллического фундамента и четвертичных отложений (табл. 4).

Из рисунка 3 видно, что более высокие значения pH среды характерны для озера Хашозера, немного меньшие – для Мягрозера, Турастамозера, Яндомозера, и наименьшие – для Леликозера, Палозера. Практически во всех озерах происходит подщелачивание среды, лишь в Турастамозере – подкисление [Шелехова, 2015].

Измеренные значения минерализации вод и pH достаточно хорошо коррелируют с реконструкциями этих показателей по результатам диатомового анализа (табл. 4), что свидетельствует о надежности метода.

Однако следует отметить, что реконструированные данные отличаются более низкими показателями, что, по-видимому, связано с их усредненностью, отвечающей условиям накопления поверхностного слоя за несколько лет. Особенно это заметно для озера Мягрозера, где пробы отбирались дночерпателем Экмана, а в остальных озерах – пробоотборником Limnos, хотя отсутствие четкой корреляции может быть связано с составом пород, а также, возможно, с быстрой разгрузкой вод через СРД или с другими причинами. Для Мягрозера, вероятно, получены более усредненные данные.

Выводы

В составе диатомовых комплексов исследованных водоемов не было выявлено сигналов, однозначно интерпретируемых как результат антропогенного воздействия. Сохранность створок в донных осадках большинства озер хорошая. В диатомовых комплексах отсутствуют в массовом количестве виды – индикаторы загрязнения, такие как, например, *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*, *Fragilaria crotonensis*, *Gomphonema parvulum*, *Meridion circulare*.

Диатомовые комплексы водоемов свидетельствуют о направленном тренде к потеплению климата, что проявляется в расширении спектра бореальных и снижении или даже исчезновении арктоальпийских форм и незначительном росте доли космополитов.

Минерализация зависит от нескольких факторов: характера подстилающих пород кристаллического фундамента и перекрывающих его четвертичных отложений, размеров и глубины водоемов, расположения в зоне СРД.

Активная реакция среды (pH) в меньшей степени зависит от размеров и глубины водоемов. Значительное влияние на нее оказывает состав подстилающих пород, усиление или снижение поверхностного стока, процессы химического выветривания.

В результате сопоставления состава современных планктонных доминантов в исследо-

ванных водоемах и литературных данных предполагается, что уровень Онежского приледникового водоема на Заонежском полуострове в позднеледниковье достигал отметок более 130 м [Демидов, 2004, 2006]. Затем он снизился до 95 м в позднем дриасе, 65–55 м составлял в пребореале, 55–48 м – в бореале, 48–43 м – в атлантикуме, 41–36 м – в суббореале, 36–33 м – в субатлантике. Эти уровни несколько отличаются от установленных ранее, поэтому при получении новых данных будут уточняться.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 14-17-00766 «Онежское озеро и его водосбор: история, освоение человеком и современное состояние».

Литература

- Барина С. С., Медведева Л. А., Анисимова О. В. Биоразнообразие водорослей – индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: PilliesStudio, 2006. 498 с.
- Генкал С. И., Трифонова И. С. Диатомовые водоросли планктона Ладожского озера и водоемов его бассейна / Отв. ред. В. Г. Девяткин; Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН; Институт озероведения РАН. Рыбинск: Рыбинский Дом печати, 2009. 72 с.
- Генкал С. И., Куликовский М. С., Михеева Т. М. и др. Диатомовые водоросли планктона реки Свислочь и ее водохранилищ. М.: Научный мир, 2013. 236 с.
- Герман К. Э., Демидов И. Н., Лаврова Н. Б. и др. Природные условия в эпоху каменного века – раннего металла в районе залива Вожмариха Онежского озера // Археология: сб. Трудов всерос. совещания. Тверь, 2005. С. 8–12.
- Голубев А. И., Рычанчик Д. В., Ромашкин А. Е., Полин А. К. Геологическое строение // Сельговые ландшафты Заонежского полуострова: природные особенности, история освоения и сохранение / Под ред. А. Н. Громцева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 17–29.
- Давыдова Н. Н. Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоемов в голоцене. Л.: Наука, 1985. 244 с.
- Девятова Э. И. Природная среда и ее изменения в голоцене. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1986. 109 с.
- Демидов И. Н. Донные отложения и колебания уровня Онежского озера в позднеледниковье // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 7. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2004. С. 207–218.
- Демидов И. Н. О максимальной стадии развития Онежского приледникового озера, изменениях его уровня и гляциоизостатическом поднятии побережий в позднеледниковье // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 9. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2006. С. 171–182.

Демидов И. Н., Лаврова Н. Б., Шелехова Т. С., Васью О. В. К вопросу о колебаниях уровня Онежского озера в голоцене // Теоретические и прикладные проблемы современной лимнологии. Минск: БГУ, 2003. С. 151–152.

Диатомовые водоросли. Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 4. М.: Советская наука, 1951. 619 с.

Диатомовый анализ. Определитель ископаемых и современных диатомовых водорослей. М.; Л.: Гос. изд-во геол. литерат., 1949. Кн. 1, 240 с.; кн. 2, 288 с.

Елина Г. А., Лукашов А. Д., Филимонова Л. В., Кузнецов О. Л. Сукцессии палеорастиельности позднеледниковья-голоцена на Заонежском полуострове и зависимости их от уровней Онежского озера. Ботанический журнал. 1999. Т. 84, № 6. С. 32–52.

Шелехова Т. С. Ископаемая диатомовая флора голоценовых озерных отложений Заонежья // Материалы международной конференции «Северная Европа в XXI веке: природа, культура, экономика». Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2006. С. 323–324.

Шелехова Т. С., Субетто Д. А., Тихонова Ю. С., Потахин М. С. Диатомовые водоросли современных отложений озер Заонежья: палеоэкологические и палеоклиматические реконструкции // Общество. Среда. Развитие. 2015. № 2. С. 151–160.

Шелехова Т. С. Современное состояние озер Заонежья по данным диатомового анализа по-

верхностных донных отложений (Карелия, Россия) // Материалы IV международной научно-практической конференции «Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы». Петрозаводск, 30 сентября – 2 октября 2015. С. 78–81.

Филимонова Л. В., Шелехова Т. С. Динамика уровня режима, зарастания и заторфовывания озера Руоколампи (заповедник «Кивач») в голоцене // Биоразнообразие, динамика и ресурсы болотных экосистем Восточной Финноскандии. Труды Карельского научного центра РАН. Петрозаводск, 2005. Вып. 8. Стр. 121–132.

Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. Teil. 1. Die Susswasserflora von Mitteleuropa / Stuttgart. 1986. S. 1–876.

Molder K., Tynni R. 1967–73. Über Finnlands rezente und subfossile Diatomeen. I–VII. Bull. Geol. Soc. Finland 39: 199–217 (1967); 40: 151–170 (1968); 41: 235–251 (1969); 42: 129–144 (1970); 43: 203–220 (1971); 44: 141–149 (1972); 45: 159–179 (1973).

Renberg I., Hellberg T. The pH history of Lakes in Southwestern Sweden, as calculated from subfossil diatom flora of the sediments // Ambio. 1982. Vol. 11, no. 1. P. 30–33.

Tynni R. Über Finnlands rezente und subfossile Diatomeen VIII–XI. Geol. Surv. Finland Bull. 274: 1–55 (1975); 284: 1–37 (1976); 296: 1–55 (1978); 312: 1–93 (1980).

Поступила в редакцию 19.01.2016

References

Barinova S. S., Medvedeva L. A., Anisimova O. V. Bioraznoobrazie vodoroslej – indikatorov okružhajushhej sredy [Diversity of algal indicators in the environmental assessment]. Tel-Aviv: PilliesStudio, 2006. 498 p.

Genkal S. I., Trifonova I. S. Diatomovye vodorosli planktona Ladozhskogo ozera i vodoemov ego bassejna [Diatoms of plankton of Lake Ladoga and water bodies of its basin]. Ed. V. G. Devjatkin; I. D. Panin Inst. for biology of inland waters of RAS; Inst. of limnology of RAS. Rybinsk: Rybinskij Dom pečati, 2009. 72 p.

Genkal S. I., Kulikovskij M. S., Mikheeva T. M., Kuznecova I. V., Luk'janova E. V. Diatomovye vodorosli planktona reki Svisloch' i ee vodohranilishh [Diatoms in plankton of the Svisloch River and its reservoirs]. Moscow: Nauchnyj mir, 2013. 236 p.

German K. Je., Demidov I. N., Lavrova N. B., Mel'nikov I. V., Shelekhova T. S. Prirodnye uslovija v jepohu kamennogo veka – rannego metalla v rajone zaliva Vozhmariha Onezhskogo ozera [Environmental conditions of the Stone Age – Early Metal period in the area of Vozhmariha gulf of Lake Onega]. Arheologija. Sb. Vse-ros. Soveshchanija [Archaeology. Rept. of all-Russian congr.]. Tver' 2005. P. 8–12.

Golubev A. I., Rychanik D. V., Romashkin A. E., Polin A. K. Geologicheskoe stroenie [Geological structure]. Sel'govye landshafty Zaonezhskogo poluostrova: prirodnye osobennosti, istorija osvoenija i sohranenie [Selka landscapes of the Zaonezhskii peninsula:

natural characteristics, land use, conversations]. Ed. A. N. Gromcev. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2013. P. 17–29.

Davydova N. N. Diatomovye vodorosli – indikatory prirodnykh uslovij vodoemov v golotsene [Diatoms as indicators of environmental conditions in Holocene water bodies]. Leningrad: Nauka, 1985. 244 p.

Devyatova E. I. Prirodnaya sreda i ee izmeneniya v golotsene [The natural environment and its changes during the Holocene]. Petrozavodsk: Karel'skii filial AN SSSR, 1986. 109 p.

Demidov I. N. Donnye otlozhenija i kolebanija urovnja Onezhskogo ozera v pozdelednikov'e [Bottom sediments and fluctuations of Onega Lake level in the Late Glacial]. Geologija i poleznye iskopaemye Karelii [Geology and mineral resources of Karelia]. Iss. 7. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2004. P. 207–218.

Demidov I. N. O maksimal'noj stadii razvitija Onezhskogo prilednikovogo ozera, izmenenij ego urovnja i glacioizostatičeskogo podnjatija poberezhij v pozdelednikov'e [On the maximum stage of the evolution of periglacial Lake Onega, changes of its level and the glacioisostatic uplift of coasts in Late Glacial]. Geologija i poleznye iskopaemye Karelii [Geology and mineral resources of Karelia]. Iss. 9. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2006. P. 171–182.

Demidov I. N., Lavrova N. B., Shelekhova T. S., Vas'ko O. V. K voprosu o kolebanijah urovnja

Onezhskogo озера в голоцене [On fluctuations of Onega Lake level in the Holocene]. Teoreticheskie i prikladnye problemy sovremennoj limnologii [Theoretical and applied problems of modern limnology]. Minsk: BGU, 2003. P. 151–152.

Diatomovye vodorosly. Opredelitel' diatomovykh vodoroslej SSSR [Diatoms. Identification guide to freshwater algae of USSR]. Iss. 4. Moscow: Sovetskaya nauka, 1951. 619 p.

Diatomovyy analiz. Opredelitel' iskopaemykh i sovremennykh diatomovykh vodoroslej [Diatom analysis. Guide to fossil and modern diatom algae]. Moscow; Leningrad: Gos. izd-vo geol. literat., 1949. B. 1, 240 p.; b. 2, 288 p.

Elina G. A., Lukashov A. D., Filimonova L. V., Kuznetsov O. L. Sukzessii paleorastitelnosti pozdnelednikov'ya golotsena na Zaonezhskom poluostrove i zavisimosti ih ot yrovnei Onezhskogo озера [Successions of the Late-Glacial palaeovegetation on Zaonezhsky Peninsula and their dependence on Onega Lake levels]. Botanicheskyy zhurnal [Botanical Journal]. 1999. Vol. 84, no. 6. P. 32–52.

Shelekhova T. S. Iskopaemaya diatomovaya flora golocenovykh otlozheniy Zaonezh'ya [Fossil diatom flora of Holocene sediments from Zaonezhye]. Materialy mezhdunarodnoy konferentsii "Severnaya Evropa v XXI veke: priroda, kultura, ekonomika" [Proc. intern. conf. "Northern Europe in the 21st century: nature, culture, economy"]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2006. P. 323–324.

Shelekhova T. S., Subetto D. A., Tikhonova Ju. S., Potakhin M. S. Diatomovye vodorosli sovremennykh otlozheniy ozer Zaonezh'ya: paleoekologicheskie i paleoklimaticheskie rekonstrukcii [Diatoms in trans-Onega modern lake sediments: paleoecological and paleoclimatic reconstructions]. Obshchestvo. Sreda. Razvitiye [Society. Environment. Development]. 2015. No. 2. P. 151–160.

Shelekhova T. S. Sovremennoe sostojanie ozer Zaonezh'ya po dannym diatomovogo analiza poverhnost-

nykh donnykh otlozhenij (Karelija, Rossiya) [Current state of the lakes of Zaonezhje according to the diatom analysis of superficial bottom sediments (Karelia, Russia)]. Materialy IV mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Jekologicheskaja geologija: teorija, praktika i regional'nye problemy". Petrozavodsk, 30 sentjabrja – 2 oktjabrja 2015 [Proc. 4th intern. res.-pract. conf. "Ecological geology: theory, practice and regional problems"]. C. 78–81.

Filimonova L. V., Shelekhova T. S. Dinamika urovnego rezhima, zarastaniya i zatorfovyvaniya озера Ruokolampi (zapovednik "Kivach") v golocene [Dynamics of water level regime, overgrowing and peat accumulation of Lake Ruokolampi (Kivach Reserve) in the Holocene]. Bioraznoobrazie, dinamika i resursy bolotnykh jekosistem Vostochnoj Fennoskandii. Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN [Biodiversity, dynamics and resources of mire ecosystems of Eastern Fennoscandia. Trans. KarRC RAS]. Petrozavodsk, 2005. Iss. 8. P. 121–132.

Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. Teil. 1. Die Susswasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart. 1986. S. 1–876.

Molder K., Tynni R. 1967–73. Uber Finnlands rezente und subfossile Diatomeen. I–VII. Bull. Geol. Soc. Finland. 39: 199–217 (1967); 40: 151–170 (1968); 41: 235–251 (1969); 42: 129–144 (1970); 43: 203–220 (1971); 44: 141–149 (1972); 45: 159–179 (1973).

Renberg I., Hellberg T. The pH history of Lakes in Southwestern Sweden, as calculated from subfossil diatom flora of the sediments. Ambio. 1982. Vol. 11, no. 1. P. 30–33.

Tynni R. Uber Finnlands rezente und subfossile Diatomeen VIII–XI. Geol. Surv. Finland Bull. 274: 1–55 (1975); 284: 1–37 (1976); 296: 1–55 (1978); 312: 1–93 (1980).

Received January 19, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Шелехова Татьяна Станиславовна

старший научный сотрудник, к. г. н.
Институт геологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: shelekh@krc.karelia.ru
тел.: (8142) 782753

Субетто Дмитрий Александрович

директор, д. г. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: subetto@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Shelekhova, Tatyana

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: shelekh@krc.karelia.ru
tel.: (8142) 782753

Subetto, Dmitry

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

УДК 551.89(470.21)

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ОЗЕРА ОСИНОВОГО (КОЛЬСКИЙ РЕГИОН) В ПОЗДНЕ- И ПОСЛЕДНИКОВОЕ ВРЕМЯ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИАТОМОВОГО АНАЛИЗА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

А. Н. Толстоброва, Д. С. Толстобров, В. В. Колька, О. П. Корсакова

Геологический институт Кольского научного центра РАН

Представлены результаты изучения донных отложений озера Осинового, расположенного в пределах Имандровской депрессии (Кольский регион). По данным диатомового анализа с учетом литологических и хронометрических (радиоуглеродного датирования) данных установлены этапы формирования донных отложений и условия осадконакопления в котловине озера Осинового на протяжении поздне- и послеледникового времени. На начальном этапе развития озера осадконакопление происходило в условиях приледникового водоема, которые затем сменились морскими. По данным радиоуглеродного анализа, связь палеоводоема с морем в Имандровской депрессии прекратилась в первой половине пребореала. Тогда же в нем установились условия, благоприятные для развития богатой и разнообразной пресноводной диатомовой флоры. На основании литологических и микропалеонтологических данных в разрезе на глубине примерно 90–100 см фиксируется момент отделения праозера Осинового от палеоИмандры. С этого времени озеро Осиновое развивается как самостоятельный водоем.

Ключевые слова: донные отложения; диатомовые водоросли; Имандровская депрессия; позднеледниковье; голоцен; Кольский регион.

A. N. Tolstobrova, D. S. Tolstobrov, V. V. Kolka, O. P. Korsakova. LATE GLACIAL AND POSTGLACIAL HISTORY OF LAKE OSINOVOYE (KOLA REGION) INFERRED FROM SEDIMENTARY DIATOM ASSEMBLAGES

The results on bottom sediments from Lake Osinovoye located in the Imandra depression (Kola region) are presented. The stages and main features of sedimentation in the Osinovoye Lake basin during the Late Glacial and Holocene were determined according to diatom data, lithology and radiocarbon data. At the initial stage of lake formation sedimentation occurred in the periglacial environment, with the sea water ingression into the Imandra depression happening at the second stage. According to radiocarbon dating, the paleobasin in the Imandra depression got detached from the sea in the first half of the Preboreal. This is when the conditions favorable for the development of the rich and diverse freshwater diatom flora established there. On the basis of lithological and micro-paleontological data separation of the Osinovoye proto-lake from the Imandra palaeolake was recorded in the sediment core at a depth of approximately 90–100 cm. Since that time Lake Osinovoye has been developing as an independent basin.

Keywords: lake bottom sediments; diatoms; Imandra depression; Late Glacial; Holocene; Kola region.

Введение

Изучением развития территории в поздне- и послеледниковое время в пределах Имандровской депрессии занимаются на протяжении многих лет. По результатам изучения рыхлых отложений ряд исследователей [Лаврова, 1960; Никонов, 1964] придерживались мнения о проникновении морских вод в позднеледниковое время в пределы Имандровской депрессии и о существовании здесь пролива между Баренцевым и Белым морями. Для выяснения вопроса, насколько далеко распространялся позднеледниковый морской залив в сторону западного окончания оз. Имандра, был исследован ряд разрезов [Арманд, Самсонова, 1969], расположенных вдоль предполагаемого залива. В результате было установлено, что западная оконечность оз. Имандра с морем не соединялась.

В последнее время на территории Кольского региона стали широко применяться палеолимнологические исследования, в результате которых получены новые данные. Были проведены исследования донных отложений в целях изучения положения древней береговой линии Баренцева и Белого морей [Snyder et al., 1997, 2000; Corner et al., 1999, 2001; Колька и др., 2013; Толстобров и др., 2015], для исследования палеогеографической ситуации, в том числе и в Имандровской депрессии [Grönlund, Kauppi, 2002; Solovieva, Jones, 2002; Николаева и др., 2015], для оценки последствий

антропогенной нагрузки на экосистемы озер [Денисов, 2012]. В результате еще раз были сделаны выводы об отсутствии морского залива в западной части Имандровской депрессии, а также установлено, что осадконакопление биогенного материала здесь началось в бореале [Николаева и др., 2015].

Целью нашей работы было литологическое, микропалеонтологическое и хронометрическое (радиоуглеродный анализ) изучение донных осадков оз. Осинового, расположенного в пределах Имандровской депрессии, для определения масштабов и времени возможного проникновения морских вод во внутреннюю часть Кольского региона, установления этапов формирования осадков в котловине оз. Осинового, имевших место на протяжении поздне- и послеледниковое время. Результаты проведенных исследований представлены в данной статье.

Краткая характеристика района работ

Озеро Осиновое ($67^{\circ}34'18''N$, $32^{\circ}38'10''E$) расположено в юго-западной части Кольского региона (рис. 1). Район работ находится в пределах северо-восточной части Беломорского террейна, который сложен породами комплекса основания, претерпевшими значительные структурно-вещественные преобразования и представленными в основном биотитовыми и амфибол-биотитовыми гнейсами, мигматитами, гранито-гнейсами и амфиболитами



Рис. 1. А – карта-схема района исследования. Положение края ледника или отдельной его лопасти: 1 – при формировании внутренней полосы пояса краевых образований в период межстадиального потепления, 2 – при образовании внешней полосы пояса в период стадийного похолодания [по Евзеров, 2009]; Б – расположение оз. Осиновое

Данные радиоуглеродного датирования образцов донных осадков озера Осинового

№ п/п	Лабораторный номер	Глубина отбора, см	Датируемый материал	Радиоуглеродный возраст	Календарный возраст
1.	ЛУ-6710	104–109	алевритистая гиттия	9820 ± 260	11 317 ± 450
2.	ЛУ-6711	114–120	песок+глина+орг. материал	9750 ± 190	11 156 ± 322

[Пожиленко и др., 2002]. Четвертичные отложения здесь представлены гравийно-песчаными моренами [Четвертичные, 1993], а котловина озера Осинового расположена в пределах краевых образований, по возрасту сопоставляемых с аллередом и поздним дриасом [Евзевров, 2009].

Исследуемое озеро находится вблизи оз. Имандра, которое разделено узкими протоками на три основных части – Большая Имандра, Экостровская Имандра и Бабинская Имандра. Озеро Осиновое приурочено к северо-западному побережью Экостровской Имандры (рис. 1). Оно находится на высотной отметке 129,0 м над уровнем моря, имеет овальную форму, площадь 10 км². Озеро проточное, на западе и северо-востоке в него впадают ручьи, сток осуществляется через ручей на юге. Берега залесены, местами заболочены.

Материалы и методы

В рамках *полевых исследований* весной 2011 г. проводился отбор колонки донных отложений, их литологическое изучение и опробование. Отбор кернов производился со льда с максимальной глубины 4,5 м при помощи ручного поршневого бура. Длина трубки 1 м, диаметр 52 мм. Керны отобраны с перекрытием в несколько сантиметров. Мощность вскрытых донных отложений составила 1,25 м. Дальнейшее исследование кернов донных отложений (литологическое описание, фотографирование, опробование) выполнялось в лабораторных условиях.

Подготовка препаратов для *диатомового анализа* производилась по стандартным методикам [Диатомовые водоросли..., 1974]. Подсчет и определение видового состава створок диатомовых водорослей были проведены при помощи биологического цифрового микроскопа Motic серии DMBA 310 при увеличении x400 и x1000 раз с использованием иммерсионного масла. Таксономическая идентификация диатомей и их экологические характеристики устанавливались при помощи определителей и других литературных источников [Определитель..., 1951; Диатомовые водоросли..., 1974, 1988, 1992; Tynni, 1975, 1976, 1978, 1980; Давыдова, 1985; Krammer, Lange-Bertalot, 1986–1991;

Лосева, 1992, 2000; Atlas of British Diatoms, 1996; Krammer, 2000, 2002, 2003; Lange-Bertalot, 2001; Баринова и др., 2006 и др.] с учетом последних таксономических изменений [<http://www.algaebase.org>].

Радиоуглеродное датирование образцов алевритистой гиттии и глины (табл.) выполнено в Санкт-Петербургском государственном университете по стандартной методике [Арсланов, 1987] с применением традиционного сцинтилляционного метода. Полученные радиоуглеродные данные калибровались при помощи программы CalPal [<http://www.calpal-online.de>].

Результаты и обсуждение

Литологическое строение разреза донных отложений

В разрезе донных отложений, вскрытых при бурении, установлены следующие слои (номера слоев и их описание указаны сверху вниз от поверхности осадка):

- (1) 0–80 см – гиттия коричневая с небольшим присутствием минеральных частиц;
- (2) 80–104 см – гиттия серо-зеленая, с минеральной составляющей, количество которой уменьшается вверх по разрезу;
- (3) 104–112 см – алевритистая гиттия серо-зеленого цвета, неяснослоистая, с макроостатками растений;
- (4) 112–115 см – песок мелкозернистый с алевритом, серого цвета;
- (5) 115–125 см – глина серая, с небольшим присутствием алеврита и дисперсной органики.

Диатомовые данные и их интерпретация

Диатомовый анализ был выполнен для 18 образцов. В разрезе представлена богатая и разнообразная диатомовая флора, было обнаружено 145 таксонов диатомовых водорослей. По изменениям в составе диатомовых комплексов выделено пять диатомовых зон (**ДЗ**) (рис. 2, 3).

ДЗ I (112–125 см) охватывает базальную часть разреза и разделена на две подзоны – **Ia** (слой 5) и **Ib** (слой 4). В глинах *слоя 5* диатомовых водорослей не обнаружено, что, возможно, свидетельствует о накоплении осадков

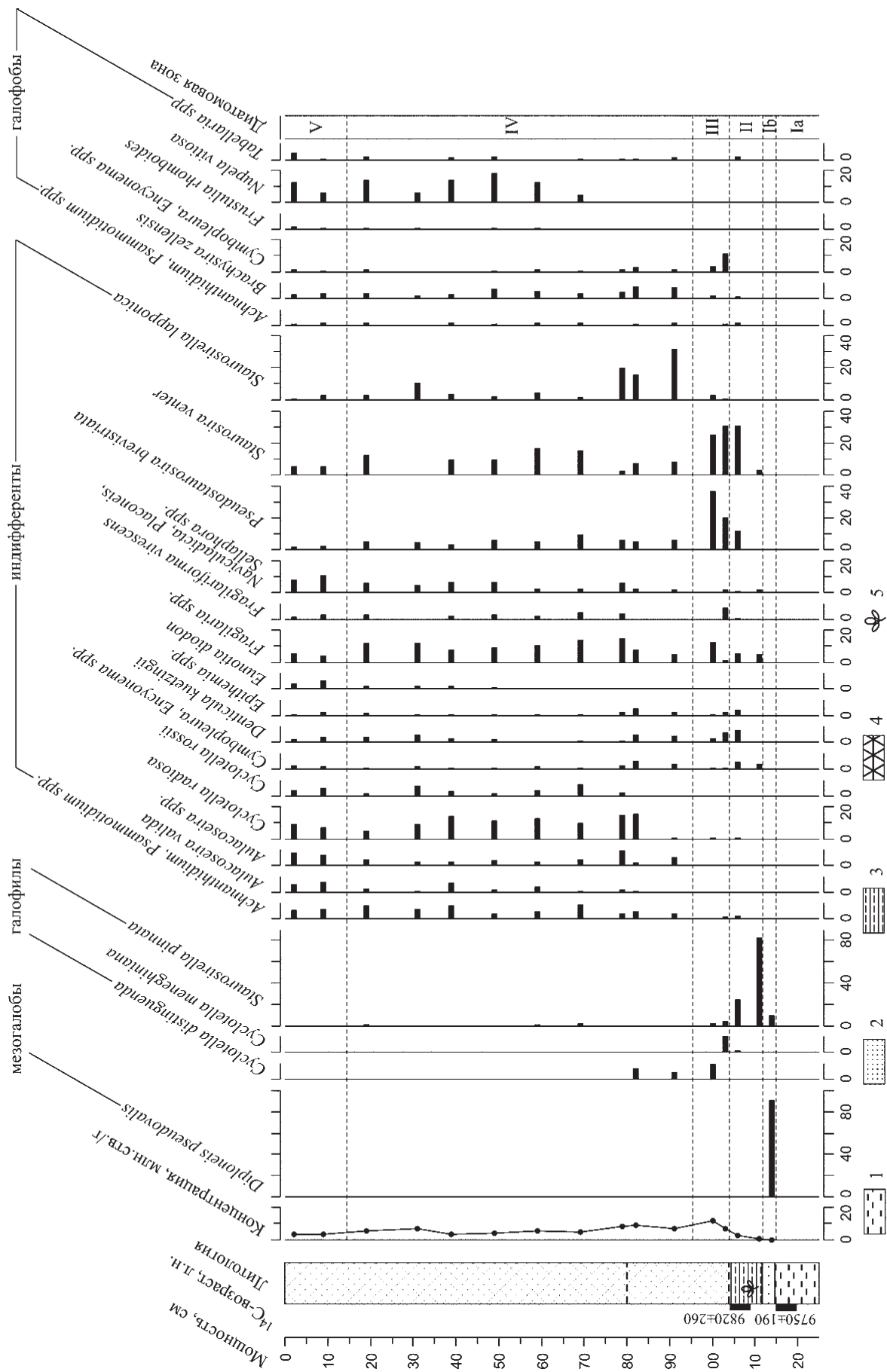


Рис. 2. Разрез донных отложений и распределение диатомов в осадках озера Осинное:
1 – глина; 2 – песок; 3 – алевролитовая гиттия с минеральной частью; 4 – гиттия с минеральной частью; 5 – макроостатки растений

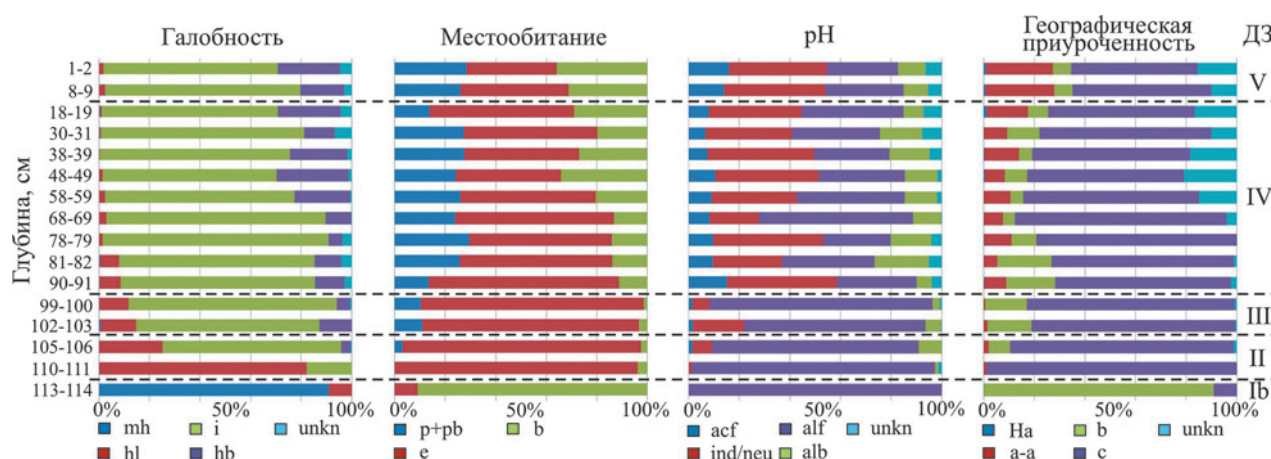


Рис. 3. Экологическая характеристика диатомовых комплексов в донных отложениях озера:

Mh – мезогалофы, hl – галофилы, i – индифференты, hb – галофобы, unk – неизвестные; p+pb – планктонные+планктонно-бентосные, e – обростатели, b – бентосные; acf – ацидофилы, ind/neu – индифференты/нейтрофилы, alf – алкаифилы, alb – алкалибионты, unk – неизвестные; Ha – голарктические, a-a – арктоальпийские, b – бореальные, c – космополиты, unk – неизвестные

в суровых условиях приледникового водоема. С глубины 114–120 см для глины слоя 5 была получена датировка 9750 ± 190 радиоуглеродных (^{14}C) лет назад (л. н.), или $11\,156 \pm 322$ календарных (кал.) л. н. (рис. 4.1). Для осадков слоя 4 характерны низкие концентрации створок диатомей. Обнаружено только два алкаифильных вида – галофил *Staurosirella pinnata* (Ehrb.) Williams et Round, обитающий в обрастаниях, и донный мезогалоб *Diploneis pseudovalis* Hust. в соотношении 10:90 соответственно. Видимо, формирование соответствующих осадков происходило в неглубоком сильно опресненном морском бассейне (рис. 4.2).

ДЗ II (104–112 см) соответствует осадкам слоя 3, где происходит некоторое увеличение таксономического разнообразия и концентрации створок диатомей. Основную массу составляют «пионерные» алкаифильные диатомеи обрастаний, представленные индифферентами *Fragilaria construens* (Ehrb.) Hust., *Pseudostaurosira brevistriata* (Grun.) Williams et Round, *Staurosira venter* (Ehrb.) Kobayasi и галофилом *Staurosirella pinnata* (Ehrb.) Williams et Round, причем содержание последней резко увеличено (82 % от общего числа видов) в нижней части интервала. Эти таксоны являются показателем «нарушенных» условий окружающей среды, они первыми заселяют водоемы на начальных этапах развития, могут существовать в суровых арктических условиях с низким уровнем проникновения света, в которых другие виды развиваться не могут, характерны для позднеледниковых пресноводных осадков [Smol, 1988; Wolfe, 1996; Grönlund, Kaupilla,

2002]. Исчезновение солоноватоводных видов и увеличение пресноводных свидетельствуют о прекращении связи с морским бассейном, оказывавшим влияние на формирование водной массы при накоплении в рассматриваемом водоеме осадков слоя 4. Преобладание диатомей обрастаний, единичные планктонные виды, наличие в осадках макроостатков водных растений свидетельствуют в пользу того, что на данном этапе водоем был мелководным, с зарослями макрофитов. Согласно датировке $9\,820 \pm 260$ ^{14}C л. н. ($11\,317 \pm 450$ кал. л. н.) (табл.) из верхней части слоя 3, отделение котловины данного озера от более крупного осолоненного бассейна произошло в первой половине пребореального времени (рис. 4.3).

ДЗ III (95–104 см) выделена в базальной части слоя 2 и характеризуется резким увеличением концентрации диатомей при общем увеличении таксономического разнообразия, что говорит о значительном увеличении продуктивности водоема. Доминирующий комплекс по-прежнему составляют обрастатели из родов *Fragilariforma*, *Staurosira*, *Staurosirella* и *Pseudostaurosira*. Наблюдается увеличение планктонных видов до 11 %, которые представлены видами рода *Cyclotella* (*C. antiqua* W. Sm., *C. distinguenda* Hust., *C. meneghiniana* Kütz., *C. radiosa* (Grun.) Lemm.). Процентное содержание галофилов уменьшается вверх по разрезу, преобладают индифференты. Возрастает количество бореальных видов (около 17 %), что может свидетельствовать о некотором потеплении окружающей среды. По показателям pH так же, как и в нижележащих осадках,

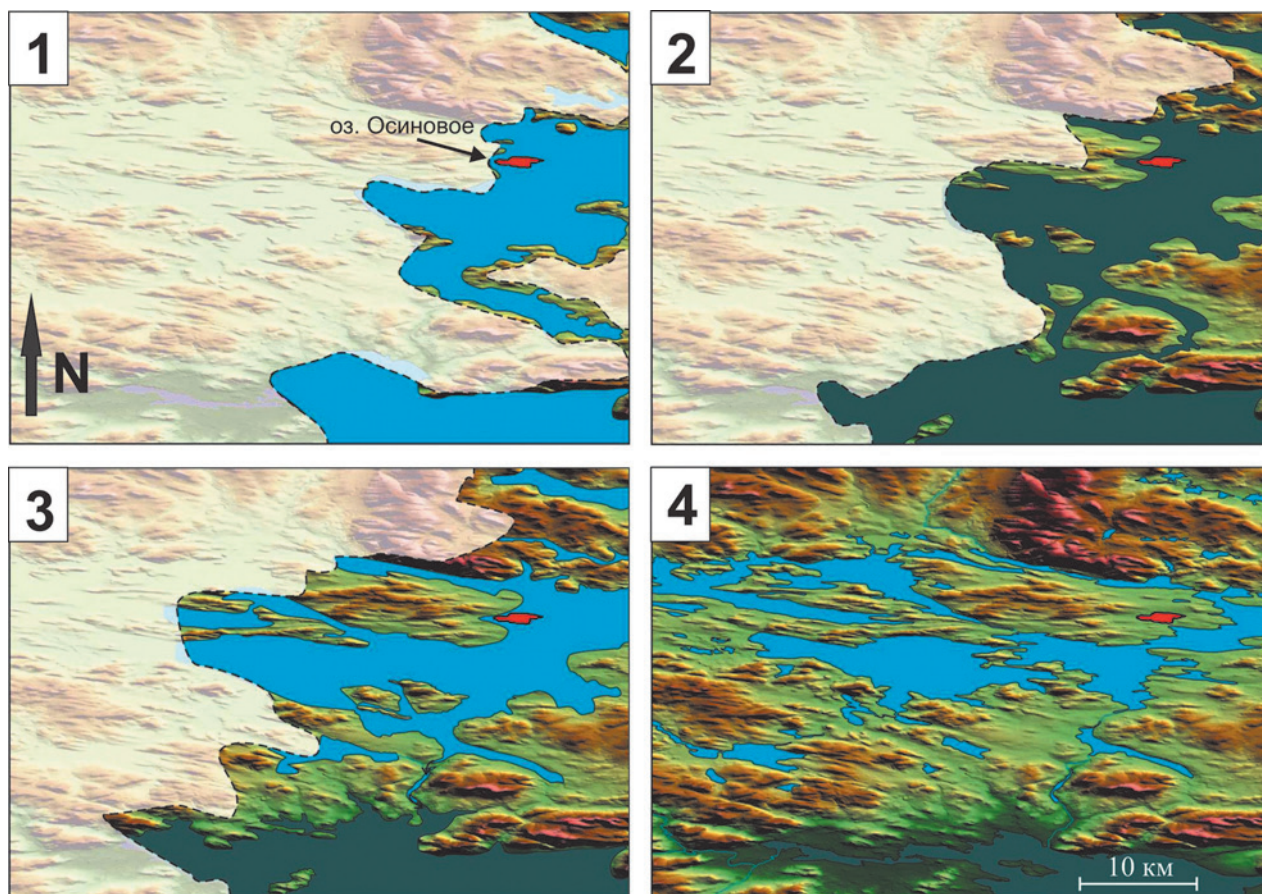


Рис. 4. Схема-реконструкция палеогеографической обстановки Имандровской депрессии в районе оз. Осинное в поздне- и последниково время (выполнена с использованием цифровой модели рельефа ASTER GDEM):

1 – стадия приледникового озера, 2 – стадия осолоненного приледникового бассейна, 3 – стадия отчленения палеоИмандры от моря, 4 – стадия современного состояния Имандровской депрессии

преобладают алкалифилы, при этом отмечено увеличение индифферентных (до 20 %) и ацидофильных (до 2 %) видов.

ДЗ IV (15–95 см) включает осадки верхней части *слоя 2* и осадки нижней части *слоя 1*. Здесь отмечено значительное увеличение планктонных диатомовых водорослей (12–29 %), состав которых становится более разнообразным. Кроме видов рода *Cyclotella* появляются виды рода *Aulacoseira* (*A. distans* (Ehrb.) Simons., *A. lacustris* (Grun.) Kramm., *A. pfaffiana* (Reinsch) Kramm., *A. subarctica* (O. Müll.) Haworth, *A. valida* (Grun.) Kramm.). При этом вверх по разрезу увеличивается и содержание донных форм (10–32 %), среди которых преобладает *Brachysira zellensis* (Grun.) Round et Mann (7 %), остальные виды представлены в меньшем количестве и очень разнообразны (различные виды родов *Brachysira*, *Caloneis*, *Diploneis*, *Navicula*, *Neidium*, *Pinnularia* и др.). Становится более богатым и состав видов-обрастателей, появляются представители рода *Eucocconeis*,

Achnanthidium, *Psammothidium*, увеличивается разнообразие среди видов из родов *Cymbella*, *Eunotia*, *Gomphonema*. Увеличение планктонных видов говорит о том, что водоем на данном этапе был относительно глубоким с достаточно прозрачной водой, что позволяло активно развиваться и донным диатомеям. Кроме того, в осадках этой зоны происходит перестройка комплексов диатомовых водорослей по отношению к pH среды, что отражается в увеличении количества индифферентных (19–42 %) и ацидофильных (5–13,5 %) видов. Вверх по разрезу возрастает роль арктоальпийских видов, а количество бореальных, напротив, снижается, что может косвенно свидетельствовать о незначительном похолодании окружающей среды, при этом виды с неясной географической приуроченностью составляют до 20 %. По отношению к солености доминируют виды-индифференты (61–84 %), увеличивается суммарное количество галофобов (9–31 %) по сравнению с нижележащими осадками. Такие

изменения (повышение водности, изменение pH среды, изменение галобности) вероятно указывают на отделение водоема, частью которого тогда являлась и котловина оз. Осинового, от палеоИмандры (рис. 4.3, 4.4).

ДЗ V (0–15 см) выделена в самой кровле разреза (верхняя часть *слоя 1*), характеризуется высоким таксономическим разнообразием, при этом концентрация створок снижается. Отмечено небольшое увеличение содержания донных видов, количество планктонных видов осталось на прежнем уровне. В качестве доминанта здесь выступает один вид – *Nupela vitiosa* (Schimanski) Siver et Hamilton, среди субдоминантов – *Aulacoseira valida*, *Cyclotella radiosа*, *C. rossi* Håkans., *Eunotia diodon* Ehrb., *Sellaphora laevissima* (Kütz.) Mann, *Staurosira venter*. Мелких эпифитов из родов *Fragilariforma*, *Staurosira*, *Staurosirella* и *Pseudostaurosira* стало заметно меньше, вероятно, из-за повышения уровня воды в озере – произошло подтопление берегов, в результате чего исчезла благоприятная среда для их обитания. Как и в подстилающих осадках, доминируют индифференты (65–72 %), вторую по численности группу составляют галофобы (22,5–28,5 %). По отношению к географической приуроченности преобладают космополиты, арктоальпийских видов становится больше (27 %), но при этом количество видов с неясной географией остается по-прежнему высоким, поэтому о температурных условиях с уверенностью говорить нельзя. В этой части разреза возрастает содержание ацидофилов (до 16 %), представленных *Frustulia rhomboides* (Ehrb.) De Toni и видами родов *Eunotia* и *Brachysira*, что указывает на естественную ацидофикацию озера.

Реконструкция этапов развития озера Осинового

В литологии и составе диатомовых комплексов донных отложений оз. Осинового нашли отражение неоднократные изменения палеогеографической ситуации в пределах Имандровской депрессии. Его образование связано с отступанием ледникового покрова в исследуемом районе в конце позднего неоплейстоцена (примерно в конце позднего дриаса). На начальном этапе развития озера здесь существовал обширный приледниковый водоем, в котором происходило накопление серых глин с алевритами, а условия для развития диатомовых водорослей были неблагоприятными. Далее в пределы Имандровской депрессии стали проникать морские воды, сформировался сильно опресненный морской бассейн, на что

указывает совместное присутствие солоноватоводных и пресноводных диатомей. Причем солоноватоводный вид *Diploneis pseudovalis* (рис. 2) отмечен в донных осадках озер аналогичного возраста на баренцевоморском побережье [Snyder et al., 1997] и не известен в осадках на беломорском [Колька и др., 2013]. Можно предположить его проникновение в пределы депрессии оз. Имандра вследствие усиления водообмена с Баренцевым морем через пролив, соединявший его с Белым морем через р. Колу. Прекращение влияния морских вод на рассматриваемый древний водоем произошло примерно в начале пребореального времени. В начале голоцена в нем происходит смена условий осадконакопления: вместо терригенных осадков начинают накапливаться органогенные. В разрезе это находит отражение в смене песков солоноватоводного генезиса на алевритистую гиттию. Диатомовая флора на данном этапе формировалась «пионерными» видами родов *Fragilaria*, *Fragilariforma*, *Staurosira*, *Staurosirella* и *Pseudostaurosira*, которые заселяют пресноводные водоемы на ранних стадиях развития и типичны для постледниковых диатомовых комплексов. В дальнейшем в рассматриваемом водоеме установились благоприятные условия для развития диатомей, о чем свидетельствует значительное увеличение концентрации и таксономического разнообразия их створок. На следующем этапе происходит смена условий осадконакопления, признаками чего являются: уменьшение количества минеральных частиц в осадке, резкие изменения в составе и структуре диатомовых комплексов – в большом количестве появляются планктонные и донные виды. Их совместное нахождение говорит о том, что водоем был достаточно глубоким, с прозрачной водой. Кроме того, происходит резкая смена в составе диатомовой флоры по отношению к pH среды. Все эти изменения вероятно указывают на то, что пр-озеро Осинное отделилось от палеоИмандры, и состав диатомовой флоры отвечает первому этапу развития современного озера Осинового. На последнем этапе накопления донных отложений происходит небольшое снижение концентрации диатомей, таксономическое разнообразие остается по-прежнему высоким, при этом отмечается перестройка в видовом составе диатомовых комплексов, становится заметно меньше эпифитных видов *Fragilaria spp.*, доминантом выступает бентосный вид *Nupela vitiosa*, а планктонные виды встречаются только в качестве субдоминантов. Небольшое увеличение ацидофильных видов указы-

вает на то, что в озере интенсифицировались процессы заболачивания.

Заключение

В результате проведенных исследований донных отложений оз. Осинового, расположенного в пределах Имандровской депрессии, можно сделать следующие выводы:

1. В котловине озера Осинового установлены осадки приледникового озера, солоноватоводные осадки морского залива и пресноводные озерные осадки, которые формировались на соответствующих этапах его развития.

2. На начальном этапе развития озера здесь существовал приледниковый водоем (рис. 4.1) с неблагоприятными для развития диатомовой флоры условиями. Далее в пределы Имандровской депрессии стали проникать морские воды, и в ней сформировался сильно опресненный морской бассейн (рис. 4.2), на что указывает совместное присутствие солоноватоводных и пресноводных диатомей в донных отложениях озера Осинового, котловина которого была частью этого бассейна. Причем осолонение Имандровской депрессии могло происходить за счет вод как Белого моря, так и Баренцева.

3. Связь палеоводоема с морем в Имандровской депрессии прекратилась примерно в начале пребореального времени (рис. 4.3). В начале голоцена в нем установились условия, благоприятные для развития богатой и разнообразной диатомовой флоры, что выражено в значительном увеличении концентрации и таксономического разнообразия диатомовых водорослей в осадках соответствующего этапа.

4. Отделение озера Осинового от палео-Имандры фиксируется в разрезе на глубине примерно 90–100 см. С этого момента озеро Осинское развивается как самостоятельный водоем (рис. 4.4). Это отражено в уменьшении количества минеральных частиц, в резком изменении состава и структуры диатомовых комплексов, когда в большом количестве появляются планктонные и донные виды, происходит перестройка в составе диатомовой флоры и по отношению к рН среды.

Авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН к. б. н. Д. Б. Денисову и А. Л. Косовой за полезные консультации по диатомовому анализу.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-05-00311-а.

Литература

Арманд А. Д., Самсонова Л. Я. Морские отложения и голоценовая тектоника района Кандалакши // Основные проблемы геоморфологии и стратиграфии антропогена Кольского полуострова. Л.: Наука, 1969. С. 96–111.

Арсланов Х. А. Радиоуглерод: геохимия и геохронология. Л.: ЛГУ, 1987. 294 с.

Баранова С. С., Медведева Л. А., Анисимова О. В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: Piles Studio, 2006. 498 с.

Давыдова Н. Н. Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоемов в голоцене. Л.: Наука, 1985. 243 с.

Денисов Д. Б. Реконструкция развития экосистемы малого горного субарктического водоема за последние 900 лет (на примере озера Академическое, Хибин, Кольский полуостров) // Труды Кольского научного центра РАН. 2012. № 2. С. 126–147.

Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Л.; СПб.: Наука, 1974. Т. I. 403 с.; 1988. Т. II, вып. 1. 116 с.; 1992. Т. II, вып. 2. 125 с.

Евзеров В. Я. Отражение вариаций климата и тектоники в составе и строении рыхлого покрова северо-восточной части Балтийского щита // Известия РАН. Серия географическая. 2009. № 6. С. 90–99.

Колька В. В., Евзеров В. Я., Мёллер Я. Й., Корнер Д. Д. Перемещение уровня моря в позднем плейстоцене – голоцене и стратиграфия донных осадков изолированных озер на южном берегу Кольского полуострова, в районе поселка Умба // Известия РАН. Серия географическая. 2013. № 1. С. 73–88.

Лаврова М. А. Четвертичная геология Кольского полуострова. М.; Л.: АН СССР, 1960. 234 с.

Лосева Э. И. Атлас пресноводных плейстоценовых диатомей европейского Северо-Востока СССР. СПб.: Наука, 1992. 272 с.

Лосева Э. И. Атлас морских плейстоценовых диатомей европейского Северо-Востока СССР. СПб.: Наука, 2000. 211 с.

Николаева С. Б., Лаврова Н. Б., Толстобров Д. С., Денисов Д. Б. Реконструкция палеогеографических обстановок голоцена в районе озера Имандра (Кольский регион): результаты палеолимнологических исследований // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 3. С. 34–47.

Никонов А. А. Развитие рельефа и палеогеография антропогена на западе Кольского полуострова. М.; Л.: Наука, 1964. 181 с.

Определитель пресноводных водорослей СССР. Диатомовые водоросли. М.: Сов. наука, 1951. Вып. 4. 620 с.

Пожиленко В. И., Гавриленко Б. В., Жиров Д. В., Жабин С. В. Геология рудных районов Мурманской области. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2002. 359 с.

Толстобров Д. С., Толстоброва А. Н., Колька В. В., Корсакова О. П. Постледниковое поднятие земной коры в северо-западной части Кольского региона // Вестник МГТУ. 2015. Т. 18, № 2. С. 295–306.

Четвертичные отложения Финляндии и Северо-Запада Российской Федерации и их сырьевые

ресурсы. Масштаб 1:1 000 000 / Ред. Й. Ниэмеля, И. М. Экман, А. Д. Лукашов. Эспоо: Геологический научно-исследовательский институт Финляндии, 1993.

An Atlas of British Diatoms / Ed. P. A. Sims. Bristol, 1996. 602 p.

Corner G. D., Kolka V. V., Yevzerov V. Ya., Moller J. J. Postglacial relative sea-level change and stratigraphy of raised coastal basins on Kola Peninsula, northwest Russia // *Global and Planetary Change*, 2001. Vol. 31. P. 153–175.

Corner G. D., Yevzerov V. Ya., Kolka V. V., Moller J. J. Isolation basin stratigraphy and Holocene relative sea-level change at the Norwegian-Russian border north of Nikel, northwest Russia // *Boreas*. 1999. Vol. 28, no. 1. P. 146–166.

Grönlund T., Kauppi T. Holocene history of Lake Soldatskoje (Kola Peninsula, Russia) inferred from sedimentary diatom assemblages // *Boreas*, 2002. Vol. 31. P. 273–284.

Krammer K. Cymbella // *Diatoms of Europe: Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats* / Ed. H. Lange-Bertalot. Vol. 3. 2002. A. R. G. Gantner Verlag K. G., Ruggell. 584 p.

Krammer K. Cymboplectra, Delicata, Navicymbula, Gomphocymbellopsis, Afrocybula Supplements to Cymbelloid Taxa // *Diatoms of Europe: Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats* / Ed. H. Lange-Bertalot. Vol. 4. 2003. A. R. G. Gantner Verlag K. G., Ruggell. 530 p.

Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae // *In Süßwasserflora von Mitteleuropa* 2/1–4. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart/Jena. 1986–1991.

Krammer K. The Genus Pinnularia // *Diatoms of Europe: Diatoms of the European Inland Waters and*

Comparable Habitats / Ed. H. Lange-Bertalot. Vol. 1. 2000. A. R. G. Gantner Verlag K. G., Ruggell. 703 p.

Lange-Bertalot H. Navicula Sensu-Stricto, 10 Genera Separated from Navicula Sensu Lato, Frustulia // *Diatoms of Europe: Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats* / Ed. H. Lange-Bertalot. Vol. 2. 2001. A. R. G. Gantner Verlag K. G., Ruggell. 526 p.

Smol J. P. Palaeoclimate proxy data from freshwater diatoms // *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* 23, 1988. P. 837–844.

Snyder J. A., Forman S. L., Mode W. N., Tarasov G. A. Postglacial relative sea-level history: sediment and diatom records of emerged coastal lakes, north-central Kola Peninsula, Russia // *Boreas*. 1997. Vol. 26. P. 329–346.

Snyder J. A., MacDonald G. M., Forman S. L. et al. Postglacial climate and vegetation history, north-central Kola Peninsula, Russia: pollen and diatom records from Lake Yarnyshnoe-3 // *Boreas*. 2000. Vol. 29. P. 261–271.

Solovieva N., Jones V. J. A multiproxy record of Holocene environmental changes in the central Kola Peninsula, northwest Russia // *J. Quaternary Sci.*, 2002. Vol. 17. P. 303–318.

Tynni R. Über Finnlands rezente und subfossile Diatomeen, VIII–XI // *Geological survey of Finland*. 1975. Bull. 274. P. 1–55; 1976. Bull. 284. P. 1–37; 1978. Bull. 296. P. 1–55; 1980. Bull. 312. P. 1–93.

Wolfe A. A high-resolution late-glacial and early Holocene diatom record from Baffin Island, eastern Canadian Arctic // *Canadian Journal of Earth Science* 33, 1996. P. 928–937.

Поступила в редакцию 11.02.2016

References

Armand A. D., Samsonova L. Ya. Morskiye otlozheniya i golotsenovaya tektonika rayona Kandalakshi [Marine sediments and the Holocene tectonics in the Kandalaksha area]. Osnovnyye problemy geomorfologii i stratigrafii Antropogena Kol'skogo poluostrova [Basic problems of the Anthropogene geomorphology and stratigraphy of the Kola Peninsula]. Leningrad: Nauka, 1969. P. 96–111.

Arslanov Kh. A. Radiouglerod: geokhimiya i geokhronologiya [Radiocarbon: geochemistry and geochronology]. Leningrad: LGU, 1987. 294 p.

Barinova S. S., Medvedeva L. A., Anisimova O. V. Bioraznoobrazie vodorosley – indikatorov okruzhayushey sredy [Diversity of algal indicators in environmental assessment]. Tel-Aviv: PiliesStudio, 2006. 498 p.

Chetvertichnyye otlozheniya Finlyandii i Severo-Zapada Rossiyskoy Federatsii i ikh syr'yevyye resursy [Quaternary deposits of Finland and the Northwestern part of the Russian Federation and their resources. Scale 1:1 000 000]. Eds Y. Niemela, I. M. Ekman, A. D. Lukashov. Espoo: Geologicheskii nauchno-issledovatel'skiy institut Finlyandii, 1993.

Davydova H. H. Diatomovye vodorosli – indikator prirodnih usloviy vodoemov v golotsene

[Diatoms – indicators of environmental conditions of water bodies in the Holocene]. Leningrad: Nauka, 1985. 243 p.

Denisov D. B. Rekonstruktsiya razvitiya ekosistemy malogo gornogo subarkticheskogo vodoyema za posledniye 900 let (na primere ozera Akademicheskoye, Khibiny, Kol'skiy poluostrov) [The diatom-infer small subarctic waterbody ecosystem development reconstruction during the last 900 years (Akademicheskoye Lake, the Khibiny, the Kola Peninsula)]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Trans. Kola Science Centre RAS]. 2012. Vol. 1, no. 2. P. 126–147.

Diatomovyye vodorosli SSSR (iskopayemyye i sovremennyye) [Diatoms of the USSR (fossil and recent)]. Leningrad; St. Petersburg: Nauka, 1974. Vol. 1. 403 p.; 1988. Vol. 2, iss. 1. 116 p.; 1992. Vol. 2, iss. 2. 125 p.

Kolka V. V., Evzerov V. Ya., Myoller Ya. Y., Korner D. D. Peremeschenie urovnya morya v pozdnem pleystotsene – golotsene i stratigrafiya donnyh osadkov izolirovannyh ozer na yuzhnom beregu Kol'skogo poluostrova, v rayone poselka Umba [The late Weichselian and Holocene relative sea-level change and isolation basin stratigraphy at the Umba settlement, southern coast of the Kola Peninsula]. *Izvestiya RAN. Seriya*

geograficheskaya [Proc. RAS. Geographical ser.]. 2013. No. 1. P. 73–88.

Lavrova M. A. Chetvertichnaya geologiya Kolskogo poluostrova [The Quaternary geology of the Kola Peninsula]. Leningrad: AN SSSR, 1960. 234 p.

Loseva E. I. Atlas morskikh pleystotsenovykh diatomey evropeyskogo Severo-Vostoka SSSR [Atlas of Pleistocene marine diatoms in the European North-East of the USSR]. St. Petersburg: Nauka, 2000. 211 p.

Loseva E. I. Atlas presnovodnykh pleystotsenovykh diatomey yevropeyskogo Severo-Vostoka SSSR [Atlas of Pleistocene freshwater diatoms in the European North-East of the USSR]. St. Petersburg: Nauka, 1992. 272 p.

Nikolayeva S. B., Lavrova N. B., Tolstobrov D. S., Denisov D. B. Rekonstruktsiya paleogeograficheskikh obstanovok golotsena v rayone ozera Imandra (Kol'skiy region): rezul'taty paleolimnologicheskikh issledovaniy [Reconstructions of Holocene paleogeographic conditions in the Lake Imandra area (Kola region): results of paleolimnological studies]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2015. No. 3. P. 34–47.

Nikonov A. A. Razvitie rel'yefa i paleogeografiya antropogena na zapade Kol'skogo poluostrova [The relief development and the anthropogene palaeogeography in the West Kola Peninsula]. Moscow; Leningrad: Nauka, 1964. 181 p.

Opredelitel' presnovodnykh vodorosley SSSR. Diatomovyye vodorosli [Key to freshwater algae of the USSR. Diatoms]. Moscow: Sov. nauka, 1951. Iss. 4. 620 p.

Pozhilenko V. I., Gavrilenko B. V., Zhirov D. V., Zhabin S. V. Geologiya rudnykh rayonov Murmanskoy oblasti [Geology of mineral areas of the Murmansk Region]. Apatity: Kol'skiy nauchnyy tsentr RAN, 2002. 359 p.

Tolstobrov D. S., Tolstobrova A. N., Kol'ka V. V., Korsakova O. P. Postlednikovoye podnyatiye zemnoy kory v severo-zapadnoy chasti Kol'skogo regiona [Postglacial uplift of the Earth crust in the north-western part of the Kola region]. *Vestnik MGTU* [Herald of MSTU]. 2015. Vol. 18. no. 2. P. 295–306.

Yevzerov V. Ya. Otrazheniye variatsiy klimata i tektoniki v sostave i stroyenii rykhlogo pokrova severo-vostochnoy chasti Baltiyskogo shchita [Climatic and tectonic variations recorded by composition and structure of the unconsolidated cover of the Northeastern Baltic Shield]. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya* [Proc. RAS. Geographical ser.]. 2009. No. 6. P. 90–99.

An Atlas of British Diatoms. Ed. P. A. Sims. Bristol, 1996. 602 p.

Corner G. D., Kolka V. V., Yevzerov V. Ya., Moller J. J. Postglacial relative sea-level change and stratigraphy of raised coastal basins on Kola Peninsula, northwest Russia. *Global and Planetary Change*, 2001. Vol. 31. P. 153–175.

Corner G. D., Yevzerov V. Ya., Kolka V. V., Moller J. J. Isolation basin stratigraphy and Holocene relative

sealevel change at the Norwegian-Russian border north of Nikel, northwest Russia. *Boreas*. 1999. Vol. 28, no. 1. P. 146–166.

Grönlund T., Kauppila T. Holocene history of Lake Soldatskoje (Kola Peninsula, Russia) inferred from sedimentary diatom assemblages. *Boreas*. 2002. Vol. 31. P. 273–284.

Krammer K. Cymbella. Diatoms of Europe: Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats. Ed. H. Lange-Bertalot. Vol. 3. 2002. A. R. G. Gantner Verlag K. G., Ruggell. 584 p.

Krammer K. Cymboplectra, Delicata, Navicymbula, Gomphocymbellopsis, Afrocymbula Supplements to Cymbelloid Taxa. Diatoms of Europe: Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats. Ed. H. Lange-Bertalot. Vol. 4. 2003. A. R. G. Gantner Verlag K. G., Ruggell. 530 p.

Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. In *Süßwasserflora von Mitteleuropa* 2/1–4. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart/Jena. 1986–1991.

Krammer K. The Genus Pinnularia. Diatoms of Europe: Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats. Ed. H. Lange-Bertalot. Vol. 1. 2000. A. R. G. Gantner Verlag K. G., Ruggell. 703 p.

Lange-Bertalot H. Navicula Sensus-Stricto, 10 Genera Separated from Navicula Sensus Lato, Frustulia. Diatoms of Europe: Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats. Ed. H. Lange-Bertalot. Vol. 2. 2001. A. R. G. Gantner Verlag K. G., Ruggell. 526 p.

Smol J. P. Palaeoclimate proxy data from freshwater diatoms. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* 23, 1988. P. 837–844.

Snyder J. A., Forman S. L., Mode W. N., Tarasov G. A. Postglacial relative sea-level history: sediment and diatom records of emerged coastal lakes, north-central Kola Peninsula, Russia. *Boreas*. 1997. Vol. 26. P. 329–346.

Snyder J. A., MacDonald G. M., Forman S. L., Tarasov G. A. & Mode W. N. Postglacial climate and vegetation history, north-central Kola Peninsula, Russia: pollen and diatom records from Lake Yarnyshnoe-3. *Boreas*. 2000. Vol. 29. P. 261–271.

Solovieva N., Jones V. J. A multiproxy record of Holocene environmental changes in the central Kola Peninsula, northwest Russia. *J. Quaternary Sci.* 2002. Vol. 17. P. 303–318.

Tynni R. Über Finnlands rezente und subfossile Diatomeen, VIII–XI. Geological survey of Finland. 1975. Bull. 274. P. 1–55; 1976. Bull. 284. P. 1–37; 1978. Bull. 296. P. 1–55; 1980. Bull. 312. P. 1–93.

Wolfe A. A high-resolution late-glacial and early Holocene diatom record from Baffin Island, eastern Canadian Arctic. *Canadian Journal of Earth Science* 33, 1996. P. 928–937.

Received February 11, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Толстоброва Алена Николаевна

младший научный сотрудник
Геологический институт Кольского научного центра РАН
ул. Ферсмана, 14, Апатиты, Мурманская обл., Россия,
184209
эл. почта: alexeeva@geoksc.apatity.ru
тел.: (81555) 79575

Толстобров Дмитрий Сергеевич

младший научный сотрудник
Геологический институт Кольского научного центра РАН
ул. Ферсмана, 14, Апатиты, Мурманская обл., Россия,
184209
эл. почта: tolstobrov@geoksc.apatity.ru

Колька Василий Васильевич

зав. лабораторией, к. г.-м. н.
Геологический институт Кольского научного центра РАН
ул. Ферсмана, 14, Апатиты, Мурманская обл., Россия,
184209
доцент
Апатитский филиал МГТУ, кафедра геологии
и полезных ископаемых
ул. Ферсмана, 50а, Апатиты, Мурманская обл., Россия,
184209
эл. почта: kolka@geoksc.apatity.ru

Корсакова Ольга Павловна

старший научный сотрудник, к. г. н.
Геологический институт Кольского научного центра РАН
ул. Ферсмана, 14, Апатиты, Мурманская обл., Россия,
184209
доцент
Апатитский филиал МГТУ, кафедра геологии
и полезных ископаемых
ул. Ферсмана, 50а, Апатиты, Мурманская обл., Россия,
184209
эл. почта: korsak@geoksc.apatity.ru

CONTRIBUTORS:

Tolstobrova, Alena

Geological Institute, Kola Science Centre,
Russian Academy of Sciences
14 Fersman St., 184209 Apatity, Murmansk Region, Russia
e-mail: alexeeva@geoksc.apatity.ru
tel.: (81555) 79575

Tolstobrov, Dmitry

Geological Institute, Kola Science Centre,
Russian Academy of Sciences
14 Fersman St., 184209 Apatity, Murmansk Region, Russia
e-mail: tolstobrov@geoksc.apatity.ru

Kolka, Vasily

Geological Institute, Kola Science Centre,
Russian Academy of Sciences
14 Fersman St., 184209 Apatity, Murmansk Region, Russia
Murmansk State Technical University Apatity Branch
50a Fersman St., 184209 Apatity, Murmansk Region, Russia
e-mail: kolka@geoksc.apatity.ru

Korsakova, Olga

Geological Institute, Kola Science Centre,
Russian Academy of Sciences
14 Fersman St., 184209 Apatity, Murmansk Region, Russia
Murmansk State Technical University Apatity Branch
50a Fersman St., 184209 Apatity, Murmansk Region, Russia
e-mail: korsak@geoksc.apatity.ru

ХРОНИКА

К 25-ЛЕТИЮ ИНСТИТУТА ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ СЕВЕРА КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН*

В 2016 г. исполняется 25 лет с момента создания Института водных проблем Севера на базе образованного 70 лет назад Отдела водных проблем (сектора гидрологии и водного хозяйства), который входил вначале в состав Карело-Финской научно-исследовательской базы АН СССР, а затем – Карельского филиала АН СССР. Организатором и руководителем Отдела был известный инженер-гидротехник С. В. Григорьев. Основные работы Отдела были связаны с изучением внутренних водоемов и водного хозяйства Карелии и оценкой возможного использования водных, биологических, энергетических ресурсов для народного хозяйства. По результатам исследований опубликованы обобщающие работы «Каталог озер Карелии» (С. В. Григорьев, Г. Л. Грицевская, 1959) и «Водно-энергетический кадастр Карельской АССР» (С. А. Берсонов, 1960), которым были присуждены премии Академии наук СССР. По данным исследований озерно-речных систем были сформированы рекомендации по проектированию, строительству и эксплуатации ГЭС. На базе полученных Отделом данных была составлена генеральная схема развития рыбного хозяйства на внутренних водоемах Карелии. В эти же годы Отдел выполнял исследования по совершенствованию питьевого водоснабжения

городов и крупных населенных пунктов Карелии (Петрозаводск, Кондопога, Сортавала и др.). В результате предложены новые места расположения водозаборных сооружений и мероприятия по совершенствованию системы водоочистки. Традиции водохозяйственных исследований в Карелии заложены организатором и многолетним руководителем Отдела д. г. н. С. В. Григорьевым («Внутренние воды Карелии и их хозяйственное использование», 1961). Эти исследования продолжены и развиты в работах К. Д. Литинской, В. Х. Лифшица, А. В. Литвиненко. Выявлены закономерности формирования и распределения водных ресурсов как одного из важнейших факторов развития производительных сил.

С 1963 г. заведующим Отделом был назначен к. т. н. (впоследствии д. т. н.) И. М. Нестеренко. Важные направления деятельности Отдела в этот период были обусловлены развитием сельского хозяйства, лесной и сельскохозяйственной мелиорации, лесозаготовок. Отдел проводил комплексные исследования вод основных озерно-речных систем с разработкой рекомендаций по их всестороннему использованию. Материалы, полученные сотрудниками Отдела, были использованы при создании комплексного справочника «Озера Карелии» (1959). В период 1960–80-х годов в связи с развитием целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности проводились комплексные исследования водоемов – приемников промышленных сточных вод.

В 1963 году Карельский филиал АН СССР был расформирован, и Отдел водных проблем временно стал учреждением СевНИИГиМ

* Статья подготовлена с использованием публикаций: Филатов Н. Н., Лифшиц В. Х., Регеранд Т. И. Институт водных проблем Севера. История создания и пути развития. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1998. 53 с.; Филатов Н. Н., Кухарев В. И. Этапы развития ИВПС КарНЦ РАН // В кн. Водные ресурсы Севера России. Итоги и перспективы исследований. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2006. С. 11–30.

Министерства мелиорации и водного хозяйства. В 1967 г. Карельский филиал АН СССР, куда вошел и Отдел, был восстановлен. Заведующим Отделом с 1968 г. назначается гидролог к. г. н. В. А. Фрейндлинг. В 1972–1976 годах Костомукшская комплексная экспедиция, которой руководил И. М. Нестеренко, провела исследования по научному обоснованию строительства горно-обогатительного комбината и г. Костомукши. В 1980–1985 гг. Отдел участвует в общесоюзной программе ГКНТ по оценке возможного влияния перераспределения водных ресурсов СССР (проблема перераспределения части стока северных рек в южные регионы страны). Проведен комплекс исследований на водоемах Карельского региона, Архангельской области, Белом море и Онежском озере. Для исследований возможных изменений элементов экосистемы озера совместно со специалистами Вычислительного центра АН СССР под руководством академика Н. Н. Моисеева начали применяться методы математического моделирования. В итоге Отдел дает отрицательное заключение об использовании вод Онежского озера для реализации задач проекта. Одновременно здесь проводятся фундаментальные работы, начатые в 1970-х годах на Вендюрской группе озер (Южная Карелия), по изучению функционирования разнотипных, в разной степени подверженных антропогенному влиянию малых водоемов. Отделом выполнены важные для Карелии с точки зрения экономики и экологии комплексные программы по проектам «АИС Природа», «Сапропель», «Заонежье», издан Медико-географический справочник Карелии.

Начало гидробиологическим и ихтиологическим работам в КФ АН СССР положено в 1946 г., а в 1962 г. в состав Отдела водных проблем была переведена группа гидробиологов, из которой в 1970 г. создана лаборатория гидробиологии. Активное участие гидробиологи принимали в работе над книгой «Фауна озер Карелии» (1965). Со временем круг объектов исследования расширяется. Начинается изучение высшей водной растительности (Е. А. Ключкина), продолженное затем А. В. Фрейндлингом. В 1970-х годах впервые в республике проводятся целенаправленные исследования групп водных организмов. С 1973 г. ведутся фундаментальные исследования в области эволюционной морфологии гидробионтов. По результатам исследований опубликована монография о происхождении и путях формирования биоты континентальных водоемов (З. С. Кауфман). В 1980-х годах выполняется изучение мейобентоса (А. Р. Хазов) и перифитона (А. И. Калугин),

макрозообентоса водоемов и водотоков в различных районах Карелии в связи оценкой их биоразнообразия (А. В. Рябинкин, В. И. Кухарев). С 1981 г. проводятся исследования по оценке роли фитопланктонных сообществ при индикации антропогенных воздействий на водные экосистемы, по диагностике адаптивных свойств пресноводного фитопланктона. В эти же годы положено начало планомерным исследованиям по водной токсикологии (И. В. Помазовская, Е. В. Флинк, Л. В. Дубровина, Н. В. Федорова). Исследовано воздействие на гидробионтов минерализации, эвтрофирования, ацидификации и гумификации.

Гидрогеологами Отдела оценены запасы, состав и качество подземных вод Карелии (И. К. Поленов, А. В. Иешина, М. А. Богачев), разработаны рекомендации по их использованию в качестве источников питьевого водоснабжения, выполнен комплекс работ по изучению минеральных вод и водоемов с лечебными грязями (марциальные воды, запасы лечебных грязей оз. Габозеро и др.), даны заключения о возможности их применения в бальнеологических целях (Е. П. Васильева, Ю. К. Поляков). Обобщение данных выполнено в монографии «Ресурсы и геохимия подземных вод Карелии» (А. В. Иешина, И. К. Поленов и др., 1987 г.).

В 1970–80-х годах продолжают многолетние комплексные исследования экосистемы Онежского озера совместно со специалистами институтов озероведения и зоологического АН СССР. Отдел большое внимание уделяет работам по программе «Разработка долгосрочных социально-экономических, научно-технических и эколого-экономических прогнозов развития народного хозяйства Карельской АССР на период 1990–1992 гг., до 2005 г.» и др. По заданию ГКНТ СССР подготовлен сводный раздел «Водные ресурсы и водное хозяйство» и выполнен прогноз использования водных ресурсов для технико-экономического доклада «Основные положения программы комплексного освоения природных ресурсов и развития производительных сил Европейского Севера СССР на период 1990–2000 гг.». Выделены водохозяйственные районы и определен их водохозяйственный профиль, сформулированы основные научно-технические проблемы, связанные с использованием водных ресурсов Карелии: охрана вод от загрязнения, обеспечение населения качественной питьевой водой, управление водным хозяйством. Проведена оценка водопотребления и водоотведения отраслями народного хозяйства.

В 1988 г. заведующим Отделом по конкурсу был избран к. г. н. Н. Н. Филатов.

В 1988–1991 годах Отдел наибольшее внимание уделяет исследованиям крупнейших озер Европы – Онежского и Ладожского. Основные работы связаны с изучением фундаментальных закономерностей процессов эвтрофирования этих водоемов. В 1990 г. опубликована обобщающая монография «Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения» (ред. З. С. Кауфман). По программе ГКНТ СССР исследований энергоактивных зон Мирового океана «Разрезы» (рук. академик Г. И. Марчук) на Онежском озере проведены уникальные эксперименты, позволившие надежно выполнить калибровку и верификацию математических моделей, разрабатываемых для морей и океанов. В связи с перспективами строительства гидроаккумулирующей станции на оз. Паанаярви (бассейн р. Оланги) проведено комплексное изучение его уникальной экосистемы. Дано заключение о недопустимости намечаемого строительства, выполнено научное обоснование для создания национального парка «Паанаярви». В эти же годы на основе анализа данных измерений и моделирования была доказана нецелесообразность строительства водорассеивающего выпуска Сегежского ЦБК. В 1988–1991 гг. проведены исследования по разделу «Водные ресурсы и водное хозяйство Европейского Севера» (Мурманская, Архангельская, Пермская, Свердловская области, Карельская и Коми АССР) для общесоюзной темы «Комплексный прогноз использования природных ресурсов и развития производительных сил зоны Севера СССР на 1991–2010 гг.».

С 1989 г. впервые совместно с Финляндией выполнены международные исследования Онежского и Ладожского озер, Финского залива и оз. Саймаа. С международным центром озер (ILEC, Япония) проведены работы по включению в мировую базу данных сведений о ряде озер Карелии. В эти годы были заложены основы создания института.

В 1991 г. благодаря рекомендациям комиссии АН СССР по комплексной проверке Отдела водных проблем (рук. чл.-корр. РАН Г. В. Воропаев), поддержке Отделения океанологии, физики атмосферы и географии РАН (рук. академик Л. М. Бреховских, ученый секретарь чл.-корр. РАН Ю. С. Долотов) и Президиума Карельского филиала Академии наук (рук. д. т. н. И. М. Нестеренко и д. б. н. А. Ф. Титов) был создан Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС), директором-организатором которого стал д. г. н. Н. Н. Филатов.

В период 1991–1995 гг. Институт проводит фундаментальные исследования термогидро-

динамических процессов и полей озер. В издательстве «Наука» изданы монографии «Процессы формирования термического режима пресноводных глубоких водоемов» (П. М. Бояринов, М. П. Петров, 1991) и «Гидродинамика озер» (Н. Н. Филатов, 1991). На основе обобщения данных по многочисленным озерам издается ряд работ: «Водные ресурсы Карелии и экология» (ред. В. Х. Лифшиц, 1992); «Каталог озер Карелии (донные отложения)» (Е. П. Васильева, Ю. К. Поляков, 1992); «Использование и охрана водных ресурсов бассейна Белого моря» (ред. В. Х. Лифшиц, 1994); «Acidification of Inland Waters (eds P. Mononen, P. Lozovik, 1994)».

В ИВПС активно внедряются новые методы и технологии изучения водных систем, в том числе дистанционные аэрокосмические, ГИС, математическое моделирование. По результатам дистанционных самолетных и спутниковых исследований изданы работы «Оценка качества вод водоемов с помощью дистанционных методов изучения водосборов» (1991) и «Введение в спутниковую лимнологию» (1989). В 1991 г. в Институте была создана лаборатория геоинформационных систем, на основе ГИС-технологий разработан «Каталог озер и рек Карелии» (Н. Н. Филатов, А. В. Литвиненко и др., 1999). Совместно со специалистами лаборатории кибернетики Института прикладных математических исследований КарНЦ РАН разработана информационно-справочная система «Озера, реки и гидротехнические сооружения Республики Карелия», переданная во многие институты, министерства и ведомства.

Совместно с Институтом океанологии РАН (академик А. С. Саркисян, д. ф.-м. н. Ю. Л. Демин) были внедрены диагностические, адаптационные и прогностические модели термогидродинамических процессов и явлений для крупных озер и Белого моря. По результатам исследований подготовлены публикации в центральных журналах и монография «Limnology and Remote sensing» (ред. К. Я. Кондратьев, Н. Н. Филатов и др., 1999, Springer-Praxis, London).

Уникальные инструментальные комплексные исследования гидрофизических и гидрометеорологических процессов и явлений в зимний период на разнотипных озерах южной Карелии начаты с 1995 г. (П. М. Бояринов, А. М. Глинский, А. В. Митрохов, Н. И. Пальшин, М. П. Петров). Они стали особенно результативными в ходе международного сотрудничества с Лундским университетом (Швеция) под руководством к. т. н. А. Ю. Тержевика. В рамках международных проектов велась разработка модели вертикальной термической

структуры и условий перемешивания в озере, совместно со специалистами ИНОЗ РАН создана модель Flake, внедренная для улучшения численного прогноза погоды ведущими центрами Европы.

В начале 1990-х годов в связи с изменившимися социально-экономическими условиями в сфере водного хозяйства разрабатывалась тема «Структура, динамика и прогнозирование водопотребления и водоотведения в районах Европейского Севера России». С 1999 г. разработана республиканская программа «Обеспечение Республики Карелия питьевой водой», вошедшая в федеральную общероссийскую целевую программу «Обеспечение населения России питьевой водой». Проблема питьевого водоснабжения региона становится одним из наиболее важных направлений работы Института. В эти годы совместно со специалистами из Финляндии (министерствами окружающей среды и сельского хозяйства, институтом окружающей среды, фирмой «Земля и вода») выполнены исследования подземных вод Карелии, найдены новые источники для проблемных регионов.

С 1992 г. под руководством зав. лабораторией гидрохимии к. х. н. (ныне д. х. н.) П. А. Лозовика проводится мониторинг многочисленных водных объектов Карелии. Результаты многолетних исследований многочисленных озер и озерно-речных систем обобщены в работе «Состояние водных объектов Республики Карелия (по результатам мониторинга 1998–2006 гг.)».

С 1990-х годов большое внимание в ИВПС КарНЦ РАН стало уделяться изучению не только самих водных систем, но и их водосборов. В 1996 г. опубликована монография Ю. В. Карпечко и И. М. Нестеренко «Водный и тепловой режим осушаемых болот и заболоченных земель Карелии». Разработаны методы расчетов радиационного баланса осушаемого болота, влагозапасов низинных осушаемых торфяников, испарения с леса и оценки его изменения при возможных колебаниях климатических характеристик в таежной зоне Европейского Севера России, а также прогнозы изменения стока для различных условий эксплуатации лесного фонда.

Проводились исследования закисления поверхностных вод Карелии, включающие наблюдения за атмосферными выпадениями. Детально исследованы процессы эвтрофирования, токсического загрязнения многочисленных озер, в частности, Онежского озера, северной части Ладоги и его притоков, а также озера Выгозеро и р. Нижний Выг, водоемов

района г. Костомукши, озер Ср. Куйто, Суоярви, Исо-Пюхьярви, Крошнозеро, Пряжинское, Святозеро, Сямозеро, притоков Белого моря, Кончезерской, Нижнесунской и Заонежской группы озер. В 1999–2004 гг. активизируется изучение гидрохимических процессов для выяснения фундаментальных закономерностей функционирования водных экосистем. Выполненные как в натурных условиях, так и методами лабораторного моделирования, исследования ориентированы на изучение состава и свойств органических веществ, кислотно-основного равновесия, на разработку геохимической классификации поверхностных вод гумидной зоны. Большое внимание уделялось процессам трансформации минеральных и органических азотсодержащих соединений, кинетическим закономерностям трансформации лабильных веществ в озерных системах, а также определению форм и миграционной способности железа, марганца и микроэлементов. На современном этапе значительные усилия направлены на выявление устойчивости водных экосистем Севера к антропогенному воздействию. Изучается реакция водных объектов на различные точечные и рассеянные источники загрязнения, исследуются процессы миграции химических элементов в воде в зависимости от факторов среды, разрабатываются критерии оценки состояния и допустимого уровня антропогенной нагрузки на водные экосистемы. Исследованиями 1998–2003 гг. выяснено, что закономерности окислительно-восстановительного диагенеза донных отложений при антропогенном воздействии проявляются в изменениях химического состава и форм элементов, перераспределении элементов по вертикали и в характере обменных процессов на границе раздела «вода – дно». (Н. А. Белкина).

Результаты гидрогеологических и гидро-геохимических исследований, полученные с учетом впервые установленных региональных фоновых концентраций всего спектра микроэлементов, позволили оценить эколого-геохимические параметры подземных вод, определить степень влияния основных видов хозяйственной деятельности на их состояние. Показано, что преимущественное распространение на территории региона имеют подземные воды удовлетворительного (неизмененного) состояния, а неудовлетворительного – распространены локально. Природные гидрогеохимические аномалии Карелии обусловлены не только избытком отдельных элементов (железо, марганец, радон), но и недостатком биологически важных (кальций, магний, йод, фтор, кобальт, хром и др.), а также их

экологически неблагоприятным соотношением (Г. С. Бородулина).

В ИВПС развивается новый, продукционный подход к изучению биологических процессов в водоеме. Т. М. Тимакова, Т. П. Куликова, М. Т. Сярки и Т. П. Полякова начали изучение процессов продукции и деструкции органического вещества на различных трофических уровнях. Продукционный подход при изучении сообществ речного зообентоса дал возможность на качественно новом уровне исследовать их структурно-функциональные изменения, происходящие в условиях воздействия различных типов антропогенных нагрузок, и повысить точность биоиндикации качества вод (В. И. Кухарев). В 1990-х годах появляются новые направления работ – экологическая биохимия и экологическая токсикология. Исследование биохимических реакций гидробионтов в условиях интоксикации и изменения биотических и абиотических факторов среды позволило выйти на новый уровень в интерпретации полученных данных и определить имеющиеся отклонения в организме гидробионтов на клеточном уровне (Т. И. Регеранд). В рамках эколого-токсикологических исследований сочетание организменного, популяционного и экосистемного подходов позволило раскрыть механизмы формирования устойчивости популяций пресноводного зоопланктона к минеральному загрязнению (Н. М. Калинкина).

С конца 1990-х годов на Онежском и Ладожском озерах совместно с Институтом проблем экологии и эволюции им А. Н. Северцова проводится цикл ихтиологических исследований современного статуса сиговых рыб, положено начало ихтиопатологическому направлению и изучению проблем адаптации рыб Северо-Запада России и фитопланктонных сообществ в условиях различных по типу антропогенных нагрузок (А. А. Лукин, Ю. Н. Шарова, А. Н. Шаров).

Разработана классификация видов пресноводного зоопланктона по устойчивости к нарушению ионного состава воды, выявлены индикаторные виды организмов для определения минерального загрязнения (Т. П. Куликова, М. Т. Сярки). Предложена методика оценки толерантности гидробионтов, применимая в полевых условиях, апробирована возможность использования полного факторного эксперимента как экспрессного способа выявления причин отравления водных беспозвоночных в зоне сброса сточных вод. Проведены исследования по таксономическому разнообразию, количественным характеристикам и структурным параметрам сообществ гидробионтов,

использованные для экологического обоснования организации охраняемых территорий и вошедшие в коллективную монографию «Разнообразие биоты Карелии: условия формирования, сообщества, виды» (2003). С конца 1990-х и по настоящее время в Институте выполняются работы по оценке качества вод на основе гистологического анализа организма рыб в водных объектах Архангельской области (бассейны рек Сев. Двина и Печора). По заданию Агентства атомной энергетики в течение года велся мониторинг водозабора большой мощности Кольской атомной электростанции. Результатом стали рекомендации по совершенствованию режима работы водозабора, нацеленные на снижение ущерба рыбным запасам оз. Имандра. Метод биологических маркеров использован в работах по оценке влияния Норильского горно-обогатительного комбината на организм рыб Норило-Пясинской водной системы (рук. А. А. Лукин).

С начала 1990-х годов ведется цикл комплексных экспериментальных работ на Белом море с использованием судовых, спутниковых наблюдений и моделирования, в первую очередь по программе ФЦП «Мировой океан» (рук. от ИВПС Н. Н. Филатов). Исследования заливов и эстуариев Белого моря выполнены по нескольким проектам РФФИ под руководством чл.-корр. РАН Ю. С. Долотова. Совместные с сотрудниками ИО РАН исследования, выполняемые под руководством акад. А. П. Лисицына, направлены на изучение взвесей и маргинальных фильтров Белого моря.

С начала 2000-х годов в Институте проводятся работы по изучению влияния климата на водные экосистемы. «Климат Восточной Фенноскандии и изменчивость уровня крупных озер» (Н. Н. Филатов, 1997); «Arctic Environment Variability in the Context of Global Change» (N. Filatov, S. Grippa, L. Nazarova, Ju. Salo, 2003) и «Климат Карелии» (Н. Н. Филатов, Л. Е. Назарова, Ю. А. Сало и др., 2004). Для выявления общих закономерностей и региональных особенностей выполнены исследования реакции водных систем озер Восточной Фенноскандии и Восточной Антарктиды (Н. Н. Филатов, Л. Е. Назарова, А. В. Толстиков, А. Н. Шаров и др.).

Внедряются модели экосистемы Белого моря, разработанные к. ф.-м. н. И. А. Нееловым в АНИИ и в Отделе системной экологии (Университет Стокгольма, к. г. н. О. П. Савчук). Для Ладожского и Онежского озер совместно с Санкт-Петербургским институтом экономики и математики РАН (профессор Л. А. Руховец) выполнено исследование реакции этих озер на

антропогенные и климатические изменения. Ряд работ по этой тематике проводится в рамках программ фундаментальных исследований РФФИ, а также международных проектов ИНТАС, ТАСИС, ИНКО-Коперникус совместно с Нансеновским центром дистанционных методов и окружающей среды (Санкт-Петербург). Результаты опубликованы в работе «Влияние потепления климата на экосистемы больших озер Северо-Запада России (Ладога и Онего)» (Л. А. Руховец, Н. Н. Филатов и др., 2003–2010; *Ladoga and Onego: Great European Lakes*. Springer-Praxis. 2010).

С 2000 г. проводится разработка нового направления фундаментальных исследований – подход к водным объектам как социоэколого-экономическим системам. Первые результаты такого изучения Белого моря были получены и опубликованы в монографии «White sea: Its Marine Environment and Ecosystem Dynamics Influenced by Global Change» (N. Filatov, D. Pozdnjakov, O. Johannessen, L. Pettersson, L. Bobilev et al., 2005) и «Белое море и водосбор» (Н. Н. Филатов, А. Ю. Тержевик, 2007).

За цикл исследований климата Арктики, которые были обобщены в четырех монографиях, изданных в издательстве Springer-Praxis, коллективу исследователей Международного научного Нансеновского фонда (О. Иоханнесен, Л. Бенгтссон, Л. Бобылев) в 2005 г. была присуждена международная премия Декарта. В написании двух из четырех представленных к премии монографий активное участие принимали сотрудники ИВПС.

В последние годы проводится работа по созданию атласов водных объектов. В 2010 г. при участии Института геологии КарНЦ РАН и ИНОЗ РАН создан Атлас Онежского озера, в 2010–2014 гг. электронная версия атласа Белого моря и его водосбора при участии институтов Карельского научного центра РАН. Совместно с СПб ЭМИ РАН (профессор В. В. Меншуткин) выполнены разработки экспертных систем, с использованием методов теории искусственного интеллекта, включающих классификацию и типизацию озер Севера России.

Сотрудники ИВПС принимают активное участие в выполнении программ фундаментальных исследований Отделения наук о Земле РАН совместно с Институтом географии по теме «Природные и социально-экономические факторы изменения окружающей среды России» (руководитель академик В. М. Котляков) и с Институтом водных проблем РАН по теме «Формирование водных ресурсов, прогноз режима и качества вод с учетом изменения климата и развития экономики» (руководители

академик М. Г. Хубларян, а затем и чл.-корр. РАН В. И. Данилов-Данильян и академик В. А. Румянцев).

Институт активно ведет исследования, которые внедряются в практику. Прежде всего отметим цикл работ по поиску подземных вод для их использования в целях питьевого водоснабжения региона, отраженных в книге «Водные ресурсы Республики Карелия и пути их использования для питьевого водоснабжения. Опыт сотрудничества Карелии и Финляндии» (2006).

Научные результаты, полученные ИВПС, постоянно используются в развитии экономики и промышленности Карелии, Мурманской и Архангельской областей. Ежегодно Институт ведет несколько договорных тем, постоянно осуществляется мониторинг водных объектов республики. За последние годы органам власти и предприятиям передано более 100 документов, в том числе выполненные в виде ГИС реестры озер, рек и гидротехнических сооружений, материалы по темам «Поиск и оценка запасов подземных вод», «Экономика и управление муниципальными службами водоснабжения», «Научно-исследовательское сопровождение программы по развитию и повышению эффективности использования водно-рекреационных объектов РК», сведения о динамике миграции горбуши по Карельскому берегу Белого моря, о влиянии нефтепродуктов на рыб рек Архангельской области. Многие разработки направлены на развитие региона: питьевое водоснабжение, мониторинг, инвентаризация водно-ресурсного потенциала, использование которого всегда лежало в основе развития экономики Карелии. Это обоснование, проектирование и строительство многочисленных ГЭС, строительство, эксплуатация предприятий лесной и целлюлозно-бумажной промышленности, организация питьевого водоснабжения, строительство и эксплуатация водозаборных и водосбросных сооружений, обоснование попусков и эксплуатации хвостохранилища Костомукшского ГОК и др. В 2006 г. совместно с Институтом проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН (рук. профессор В. А. Маслобоев) ИВПС принял участие в научном обосновании прокладки трассы магистрального газопровода со Штокмановского месторождения, совместно с чл.-корр. РАН Т. И. Моисеенко – в оценке влияния стока с водосбора, атмосферных выпадений, тепловых выбросов Кольской атомной станции на оз. Имандра, активно работает по программам совершенствования питьевого водоснабжения в России, готовит рекомендации для слушаний в комитетах Государственной думы и Федерального собрания РФ,



Григорьев Г.С.

ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ СЕВЕРА КАРНЦ РАН

20 лет



СЕКТОР (1964г.) -
ОТДЕЛ (1972г.) -
ИНСТИТУТ (1991г.)



Сотрудники ИВПС КарНЦ РАН, 2011 г.

Межпарламентской ассамблеи стран СНГ, Законодательного собрания РК.

Институт участвовал в разработке инновационных проектов, в том числе в рамках программ Минэкономразвития РК по программе «Разработка и внедрение научно-исследовательских композитных судов проекта «Полярный Одиссей» для сети дрейфующих полярных станций нового поколения, постоянного мониторинга Арктического и Субарктического регионов, совместно с Петрозаводским государственным университетом выполнен инновационный проект «Решение проблем стандартизации и сертификации услуг использования вод Онежского озера как источника водоснабжения, а также донных отложений Кондопожской губы для коммерческого использования».

К 20-летию создания ИВПС в своем составе имел около 80 сотрудников, ежегодно проходили обучение 5–6 аспирантов. В 2000-х годах докторские диссертации защитили П. А. Лозовик, А. А. Лукин, Ю. В. Карпечко, Н. М. Калинкина, Ю. Н. Лукина. За период существования ИВПС число кандидатов наук возросло вдвое.

В последние годы возникают существенные проблемы, связанные с техногенными авариями и катастрофами, поэтому в Институте поставлена задача разработки методов, теорий, способных если не предотвратить последствия таких катастроф, то дать рекомендации по их ликвидации. Применительно к гидрологии, лимнологии и океанологии это разработка теории динамики водных экосистем, дающей возможность практического прогнозирования не только в обычных, но и в экстремальных ситуациях.

Наиболее перспективные задачи, выполняемые Институтом в настоящее время, становятся междисциплинарными, для решения которых создаются группы специалистов различных дисциплин, объединенных не только общим руководством и местом проведения исследований, но и единой идеей и задачей. Особое значение приобретают работы, связанные с управлением ресурсами водных систем, когда необходимо переходить от теории к решению практических проблем оптимального управления природными объектами.

В 2013 г. по рекомендации чл.-корр. РАН Н. Н. Филатова директором института был избран д. г. н. Д. А. Субетто. С его приходом помимо традиционных для института направлений работ были начаты палеолимнологические исследования, создана лаборатория палеолимнологии.

Последние три года в ИВПС кроме выполнения Государственных заданий по основным направлениям исследований, определенных

Уставом (ФАНО), проводится широкий комплекс работ по грантам РФФИ: «Озера России – диагноз и прогноз состояния экосистем при климатических и антропогенных воздействиях» (рук. чл.-корр. РАН Н. Н. Филатов), «Онежское озеро и его водосбор: история геологического развития, освоение человеком и современное состояние» (рук. д. г. н. Д. А. Субетто); грантам РФФИ, РГО, по программе Президиума РАН «Арктика». Впервые начаты уникальные исследования по международному российско-швейцарскому гранту «Ладожское озеро – жизнь подо льдом» (грант фонда ЭЛЕМО, Ф. Паулсен), в рамках которого выполняются комплексные исследования подо льдом Ладожского и Онежского озер. Институт подготовил важные экспертные заключения для разработки проекта федерального закона об охране Ладожского и Онежского озер, по развитию исследований Арктики, по проблемам исследования и использования водных ресурсов Севера для Совета Безопасности РФ. По результатам исследований издан справочник «Озера Карелии» (ред. Н. Н. Филатов, В. И. Кухарев). По гранту РГО создан первый географический атлас Карелии, издана обобщающая монография «Крупнейшие озера – водохранилища северо-запада ЕТР: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях» (2015).

С 2015 г. в «Трудах Карельского научного центра РАН» впервые началось издание серии «Лимнология». Сотрудники института входят в редакционные коллегии и редсоветы журналов: «Geophysica», Finland; «Водные ресурсы», Москва; «Труды Карельского научного центра РАН», Петрозаводск; «Региональная экология», С.-Петербург; «Гидрофизика», С.-Петербург; в состав советов по присуждению ученой степени РГПУ им. Герцена, Санкт-Петербург; МГИ, Севастополь; ПетрГУ, Петрозаводск; в экспертные советы Программ Президента РФ, РФФИ, Минобрнауки, ОНЗ РАН, а также входят в состав президиума Карельского научного центра РАН, ПетрГУ, Русского географического общества (РГО).

В настоящее время в Институте работает 79 сотрудников, в том числе 40 научных сотрудников (22 кандидата и 6 докторов наук), 1 член-корреспондент РАН. Имеются современные оборудованные лаборатории, НИС «Эколог» класса «река-море». Все это позволяет проводить исследования на самом современном уровне. Учитывая относительно небольшой штат нашего комплексного научного учреждения, Институт кооперируется с сильнейшими специалистами и группами других институтов.

ИВПС сотрудничает со всеми научными подразделениями Карельского научного центра и многими институтами РАН: океанологии, водных проблем, ИНОЗ, ИВМ, ММБИ, ИППЭС КНЦ РАН, НИИЦЭБ, ААНИИ, а также с МГУ и СПбГУ, Центром «Аэрокосмос», рядом зарубежных научных организаций – такими как Институт метеорологии Макса Планка (Германия), Центр дистанционных методов и окружающей среды,

Берген (Норвегия), университеты Хельсинки, Йоэнсуу (Финляндия), Лунда, Упсала и Стокгольма (Швеция). Институт является соучредителем научного фонда им. Ф. Нансена, входит в ряд международных и российских организаций: SIL, NRB, Русское географическое общество, Гидробиологическое общество.

Н. Н. Филатов

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

(требования к работам, представляемым к публикации
в «Трудах Карельского научного центра Российской академии наук», с 2015 г.)

«Труды Карельского научного центра Российской академии наук» (далее – Труды КарНЦ РАН) публикуют результаты завершённых оригинальных исследований в различных областях современной науки: теоретические и обзорные статьи, сообщения, материалы о научных мероприятиях (симпозиумах, конференциях и др.), персоналии (юбилеи и даты, потери науки), статьи по истории науки. Представляемые работы должны содержать новые, ранее не публиковавшиеся данные.

Статьи проходят обязательное рецензирование. Решение о публикации принимается редакционной коллегией серии или тематического выпуска Трудов КарНЦ РАН после рецензирования, с учётом научной значимости и актуальности представленных материалов. Редколлегия серий и отдельных выпусков Трудов КарНЦ РАН оставляет за собой право возвращать без регистрации рукописи, не отвечающие настоящим правилам.

При получении редакцией рукопись регистрируется (в случае выполнения авторами основных правил ее оформления) и направляется на отзыв рецензентам. Отзыв состоит из ответов на типовые вопросы анкеты и может содержать дополнительные расширенные комментарии. Кроме того, рецензент может вносить замечания и правки в текст рукописи. Авторам высылаются электронная версия анкеты и комментарии рецензентов. Доработанный экземпляр автор должен вернуть в редакцию вместе с первоначальным экземпляром и ответом на все вопросы рецензента не позднее чем через месяц после получения рецензии. Перед опубликованием авторам высылаются распечатанная версия статьи, которая вычитывается, подписывается авторами и возвращается в редакцию.

Журнал имеет полноценную электронную версию на базе Open Journal System (OJS), позволяющую перевести предоставление и редактирование рукописи, общение автора с редколлегиями серий и рецензентами в электронный формат и обеспечивающую прозрачность процесса рецензирования при сохранении анонимности рецензентов (<http://journals.krc.karelia.ru/>).

Редакционный совет журнала «Труды Карельского научного центра РАН» (Труды КарНЦ РАН) определил для себя в качестве одного из приоритетов полную открытость издания. Это означает, что пользователям на условиях свободного доступа разрешается: читать, скачивать, копировать, распространять, печатать, искать или находить полные тексты статей журнала по ссылке без предварительного разрешения от издателя и автора. Учредители журнала берут на себя все расходы по редакционно-издательской подготовке статей и их опубликованию.

Содержание номеров Трудов КарНЦ РАН, аннотации и полнотекстовые электронные варианты статей, а также другая полезная информация, включая настоящие Правила, доступны на сайтах – <http://transactions.krc.karelia.ru>; <http://journals.krc.karelia.ru>

Почтовый адрес редакции: 185000, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, КарНЦ РАН, редакция Трудов КарНЦ РАН. Телефон: (8142) 762018.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ

Статьи публикуются на русском или английском языке. Рукописи должны быть тщательно выверены и отредактированы авторами.

Объём рукописи (включая таблицы, список литературы, подписи к рисункам, рисунки) не должен превышать: для обзорных статей – 30 страниц, для оригинальных – 25, для сообщений – 15, для хроники и рецензий – 5–6. Объём рисунков не должен превышать 1/4 объёма статьи. Рукописи большего объёма (в исключительных случаях) принимаются при достаточном обосновании по согласованию с ответственным редактором.

При оформлении рукописи применяется полуторный межстрочный интервал, шрифт Times New Roman, кегль 12, выравнивание по обоим краям. Размер полей страницы – 2,5 см со всех сторон. Все страницы, включая список литературы и подписи к рисункам, должны иметь сплошную нумерацию в нижнем правом углу. Страницы с рисунками не нумеруются.

Рукописи подаются в электронном виде в формате MS Word на сайте <http://journals.krc.karelia.ru> либо на e-mail: trudy@krc.karelia.ru, или же представляются в редакцию лично (г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, каб. 502). К рукописи желательно прилагать два бумажных экземпляра, напечатанных на одной стороне листа формата А4 в одну колонку.

ОБЩИЙ ПОРЯДОК РАСПОЛОЖЕНИЯ ЧАСТЕЙ СТАТЬИ

Элементы статьи должны располагаться в следующем порядке: *УДК* курсивом на первой странице, в левом верхнем углу; заглавие статьи на русском языке заглавными буквами полужирным шрифтом; инициалы, фамилии всех авторов на русском языке полужирным шрифтом; полное название организации – места работы каждого автора в именительном падеже на русском языке курсивом (если авторов несколько и работают они в разных учреждениях, следует отметить арабскими цифрами соответствие фамилий авторов учреждениям, в которых они работают; если все авторы статьи работают в одном учреждении, можно не указывать место работы каждого автора отдельно); аннотация на русском языке; ключевые слова на русском языке; инициалы, фамилии всех авторов на английском языке полужирным шрифтом; название статьи на английском языке заглавными буквами полужирным шрифтом; аннотация на английском языке; ключевые слова на английском языке; текст статьи (статья экспериментального характера, как правило, должны иметь разделы: **Введение. Материалы и методы. Результаты и обсуждение. Выводы** либо **Заключение**); благодарности и указание источников финансирования выполненных исследований; списки литературы: с библиографическими описаниями на языке и алфавите оригинала (**Литература**) и транслитерированный в латиницу с переводом русскоязычных источников на английский язык (**References**); таблицы (на отдельных листах); рисунки (на отдельных листах); подписи к рисункам (на отдельном листе).

На отдельном листе дополнительные сведения об авторах: фамилии, имена, отчества всех авторов полностью на русском и английском языке; полный почтовый адрес каждой организации (страна, город) на русском и английском языке; должности, научные звания, ученые степени авторов; адрес электронной почты для каждого автора; телефон для контактов с авторами статьи (можно один на всех авторов).

ЗАГЛАВИЕ СТАТЬИ должно точно отражать содержание статьи* и состоять из 8–10 значимых слов.

АННОТАЦИЯ** должна быть лишена вводных фраз, создавать возможно полное представление о содержании статьи и иметь объем не менее 200 слов. Рукопись с недостаточно раскрывающей содержание аннотацией может быть отклонена.

Отдельной строкой приводится перечень КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ (не менее 5). Ключевые слова или словосочетания отделяются друг от друга точкой с запятой, в конце фразы ставится точка. Слова, фигурирующие в заголовке статьи, ключевыми являться не могут.

Раздел «Материалы и методы» должен содержать сведения об объекте исследования с обязательным указанием латинских названий и сводок, по которым они приводятся, авторов классификаций и пр. Транскрипция географических названий должна соответствовать атласу последнего года издания. Единицы физических величин приводятся по Международной системе СИ. Желательна статистическая обработка всех количественных данных. Необходимо возможно точнее обозначать местонахождения (в идеале – с точным указанием географических координат).

Изложение результатов должно заключаться не в пересказе содержания таблиц и графиков, а в выявлении следующих из них закономерностей. Автор должен сравнить полученную им информацию с имеющейся в литературе и показать, в чем заключается ее новизна. Следует ссылаться на табличный и иллюстративный материал так: на рисунки, фотографии и таблицы в тексте (рис. 1, рис. 2, табл. 1, табл. 2 и т. д.), фотографии, помещаемые на вклейках (рис. I, рис. II). Обсуждение завершается формулировкой в разделе «Заключение» основного вывода, которая должна содержать конкретный ответ на вопрос, поставленный во «Введении». Ссылки на литературу в тексте даются фамилиями, например: Карху, 1990 (один автор); Раменская, Андреева, 1982 (два автора); Крутов и др., 2008 (три автора или более) либо начальным словом описания источника, приведенного в списке литературы, и заключаются в квадратные скобки. При перечислении нескольких источников работы располагаются в хронологическом порядке, например: [Иванов, Топоров, 1965; Успенский, 1982; Erwin et al., 1989; Атлас..., 1994; Longman, 2001].

ТАБЛИЦЫ нумеруются в порядке упоминания их в тексте, каждая таблица имеет свой заголовок. На полях бумажного экземпляра рукописи (слева) карандашом указываются места расположения таблиц при первом упоминании их в тексте. Диаграммы и графики не должны дублировать таблицы. Материал таблиц должен быть понятен без дополнительного обращения к тексту. Все сокращения, использованные в таблице, поясняются в Примечании, расположенном под ней. При повторении цифр в столбцах нужно их повторять, при повторении слов – в столбцах ставить кавычки. Таблицы могут быть книжной или альбомной ориентации (при соблюдении вышеуказанных параметров страницы).

РИСУНКИ представляются отдельными файлами с расширением 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, а также транслитерированный в латиницу список использованной литературы приобретают особое значение.

нием желательного размера рисунка, пожеланий и требований к конкретным иллюстрациям. На каждый рисунок должна быть как минимум одна ссылка в тексте. Иллюстрации объектов, исследованных с помощью фотосъемки, микроскопа (оптического, электронного трансмиссионного и сканирующего), должны сопровождаться масштабными линейками, причем в подрисуночных подписях надо указать длину линейки. Приводить данные о кратности увеличения необязательно, поскольку при публикации рисунков размеры изменятся. Крупномасштабные карты желательно приводить с координатной сеткой, обозначениями населенных пунктов и/или названиями физико-географических объектов и разной фактурой для воды и суши. В углу карты желательна врезка с мелкомасштабной картой, где был бы указан участок, увеличенный в крупном масштабе в виде основной карты.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ должны содержать достаточно полную информацию, для того чтобы приводимые данные могли быть понятны без обращения к тексту (если эта информация уже не дана в другой иллюстрации). Аббревиации расшифровываются в подрисуночных подписях.

ЛАТИНСКИЕ НАЗВАНИЯ. В расширенных латинских названиях таксонов не ставится запятая между фамилией авторов и годом, чтобы была понятна разница между полным названием таксона и ссылкой на публикацию в списке литературы. Названия таксонов рода и вида печатаются курсивом. Вписывать латинские названия в текст от руки недопустимо. Для флористических, фаунистических и таксономических работ при первом упоминании в тексте и таблицах приводится русское название вида (если такое название имеется) и полностью – латинское, с автором и желательно с годом, например: водяной ослик (*Asellus aquaticus* (L. 1758)). В дальнейшем можно употреблять только русское название или сокращенное латинское без фамилии автора и года опубликования, например, для брюхоногого моллюска *Margarites groenlandicits* (Gmelin 1790) – *M. groenlandicus* или для подвида *M. g. umbilicalis*.

СОКРАЩЕНИЯ. Разрешаются лишь общепринятые сокращения – названия мер, физических, химических и математических величин и терминов и т. п. Все сокращения должны быть расшифрованы, за исключением небольшого числа общеупотребительных.

БЛАГОДАРНОСТИ. В этой рубрике выражается признательность частным лицам, сотрудникам учреждений и фондам, оказавшим содействие в проведении исследований и подготовке статьи, а также указываются источники финансирования работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ. Пристатейные ссылки и/или списки пристатейной литературы следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5-2008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления (http://www.bookchamber.ru/GOST_P_7.0.5.-2008). Список работ представляется в алфавитном порядке. Все ссылки даются на языке оригинала (названия на японском, китайском и других языках, использующих нелатинский шрифт, пишутся в русской транскрипции). Сначала приводится список работ на русском языке и на языках с близким алфавитом (украинский, болгарский и др.), а затем – работы на языках с латинским алфавитом. В списке литературы между инициалами ставится пробел.

ТРАНСЛИТЕРИРОВАННЫЙ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (References). Приводится отдельным списком, повторяя все позиции основного списка литературы. Описания русскоязычных работ указываются в латинской транслитерации, рядом в квадратных скобках помещается их перевод на английский язык. Выходные данные приводятся на английском языке (допускается транслитерация названия издательства). При наличии переводной версии источника можно указать его библиографическое описание вместо транслитерированного. Библиографические описания прочих работ приводятся на языке оригинала. Для составления списка рекомендуется использование бесплатной программы транслитерации на сайте <http://translit.ru/>, вариант BCI.

Внимание! С 2015 года каждой статье, публикуемой в «Трудах Карельского научного центра РАН», редакцией присваивается уникальный идентификационный номер цифрового объекта (DOI) и статья включается в базу данных Crossref. **Обязательным условием является указание в списках литературы DOI для тех работ, у которых он есть.**

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ 1-Й СТРАНИЦЫ

УДК 631.53.027.32:635.63

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ПРЕДПОСЕВНОГО ЗАКАЛИВАНИЯ СЕМЯН НА ХОЛОДОУСТОЙЧИВОСТЬ РАСТЕНИЙ ОГУРЦА

Е. Г. Шерудило¹, М. И. Сысоева¹, Г. Н. Алексейчук², Е. Ф. Марковская¹

¹Институт биологии Карельского научного центра РАН

²Институт экспериментальной ботаники НАН Республики Беларусь им. В. Ф. Купревича

Аннотация на русском языке

Ключевые слова: *Cucumis sativus* L.; кратковременное снижение температуры; устойчивость.

E. G. Sherudilo, M. I. Sysoeva, G. N. Alekseichuk, E. F. Markovskaya. EFFECTS OF DIFFERENT REGIMES OF SEED HARDENING ON COLD RESISTANCE IN CUCUMBER PLANTS

Аннотация на английском языке

Key words: *Cucumis sativus* L.; temperature drop; resistance.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТАБЛИЦЫ

Таблица 2. Частота встречаемости видов нематод в исследованных биотопах

Биотоп (площадка)	Кол-во видов	Встречаемость видов нематод в 5 повторностях				
		100 %	80 %	60 %	40 %	20 %
1Н	26	8	4	1	5	8
2Н	13	2	1	1	0	9
3Н	34	13	6	3	6	6
4Н	28	10	5	2	2	9
5Н	37	4	10	4	7	12

Примечание. Здесь и в табл. 3–4: биотоп 1Н – территория, заливаемая в сильные приливы; 2Н – постоянно заливаемый луг; 3Н – редко заливаемый луг; 4Н – незаливаемая территория; 5Н – периодически заливаемый луг.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ПОДПИСИ К РИСУНКУ

Рис. 1. Северный точильщик (*Hadrobregmus confuses* Kraaz.)

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ

Ссылки на книги

Вольф Г. Н. Дисперсия оптического вращения и круговой дихроизм в органической химии / Ред. Г. Снатцке. М.: Мир, 1970. С. 348–350.

Патрушев Л. И. Экспрессия генов. М.: Наука, 2000. 830 с.

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques / Eds P. V. Sundaram, F. L. Eckstein. N. Y., San Francisco: Acad. Press, 1978. P. 169–188.

В транслитерированном списке литературы:

Vol'f G. N. Dispersiya opticheskogo vrashheniya i krugovoj dikhroizm v organicheskoy khimii [Optical rotatory dispersion and circular dichroism in Organic Chemistry]. Ed. G. Snattske. Moscow: Mir, 1970. P. 348–350.

Patrushev L. I. Ekspressiya genov [Gene expression]. Moscow: Nauka, 2000. 830 p.

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques. Eds P. V. Sundaram, F. L. Eckstein. N. Y., San Francisco: Acad. Press, 1978. P. 169–188.

Ссылки на статьи

Викторов Г. А. Межвидовая конкуренция и сосуществование экологических гомологов у паразитических перепончатокрылых // Журн. общ. биол. 1970. Т. 31, № 2. С. 247–255.

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri* // J. Fish. Biol. 1978. Vol. 12, no. 4. P. 507–516.

Noctor G., Queval G., Mhamdi A., Chaouch A., Foyer C. H. Glutathione // Arabidopsis Book. American Society of plant Biologists, Rockville, MD. 2011. doi:10.1199/tab.0142

В транслитерированном списке литературы:

Viktorov G. A. Mezvidovaya konkurentsiya i sosushhestvovanie ehkologicheskikh gomologov u paraziticheskikh pereponchatokrylykh [Interspecific competition and coexistence ecological homologues in parasitic Hymenoptera]. Zhurn. obshh. biol. 1970. Vol. 31, no. 2. P. 247–255.

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri*. J. Fish. Biol. 1978. Vol. 12, no. 4. P. 507–516.

Noctor G., Queval G., Mhamdi A., Chaouch A., Foyer C. H. Glutathione. Arabidopsis Book. American Society of plant Biologists, Rockville, MD. 2011. doi:10.1199/tab.0142

Ссылки на материалы конференций

Марьянских Д. М. Разработка ландшафтного плана как необходимое условие устойчивого развития города (на примере Тюмени) // Экология ландшафта и планирование землепользования: тезисы докл. Всерос. конф. (Иркутск, 11–12 сент. 2000 г.). Новосибирск, 2000. С. 125–128.

В транслитерированном списке литературы:

Mar'inskikh D. M. Razrabotka landshaftnogo plana kak neobkhodimoe uslovie ustoichivogo razvitiya goroda (na primere Tyumeni) [Landscape planning as a necessary condition for sustainable development of a city (example of Tyumen)]. *Ekologiya landshafta i planirovanie zemlepol'zovaniya: tezisy dokl. Vseros. konf. (Irkutsk, 11–12 sent. 2000 g.)* [Landscape ecology and land-use planning: abstracts of all-Russian conference (Irkutsk, Sept. 11–12, 2000)]. Novosibirsk, 2000. P. 125–128.

Ссылки на диссертации или авторефераты диссертаций

Шефтель Б. И. Экологические аспекты пространственно-временных межвидовых взаимоотношений землероек Средней Сибири: автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1985. 23 с.

Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: дис. ... докт. хим. наук. Петрозаводск, 2006. 481 с.

В транслитерированном списке литературы:

Sheftel' B. I. *Ekologicheskie aspekty prostranstvenno-vremennykh mezhvidovykh vzaimootnoshenii zemlerоек Srednei Sibiri* [Ecological aspects of spatio-temporal interspecies relations of shrews of Middle Siberia]: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Moscow, 1985. 23 p.

Lozovik P. A. *Gidrogeokhimicheskie kriterii sostoyaniya poverkhnostnykh vod gumidnoi zony i ikh ustoichivosti k antropogennomu vozdeistviyu* [Hydrogeochemical criteria of the state of surface water in humid zone and their tolerance to anthropogenic impact]: DSc (Dr. of Chem.) thesis. Petrozavodsk, 2006. 481 p.

Ссылки на патенты

Патент РФ № 2000130511/28.04.12.2000.

Еськов Д. Н., Серегин А. Г. Оптико-электронный аппарат // Патент России № 2122745. 1998. Бюл. № 33.

В транслитерированном списке литературы:

Patent RF № 2000130511/28. 04.12.2000 [Russian patent No. 2000130511/28. December 4, 2000].

Es'kov D. N., Seregin A. G. *Optiko-elektronnyi apparat* [Optoelectronic apparatus]. Patent Rossii № 2122745 [Russian patent No. 2122745]. 1998. Bulletin No. 33.

Ссылки на архивные материалы

Гребенщиков Я. П. К небольшому курсу по библиографии: материалы и заметки, 26 февр. – 10 марта 1924 г. // ОР РНБ. Ф. 41. Ед. хр. 45. Л. 1–10.

В транслитерированном списке литературы:

Grebenshchikov Ya. P. *K nebol'shomu kursu po bibliografii: materialy i zametki*, 26 fevr. – 10 marta 1924 g. [Brief course on bibliography: the materials and notes, Febr. 26 – March 10, 1924]. OR RNB. F. 41. St. un. 45. L. 1–10.

Ссылки на интернет-ресурсы

Паринов С. И., Ляпунов В. М., Пузырев Р. Л. Система Соционет как платформа для разработки научных информационных ресурсов и онлайн-сервисов // Электрон. б-ки. 2003. Т. 6, вып. 1. URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (дата обращения: 25.12.2015).

Демография. Официальная статистика / Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gks.ru/> (дата обращения: 25.12.2015).

В транслитерированном списке литературы:

Parinov S. I., Lyapunov V. M., Puzyrev R. L. *Sistema Sotsionet kak platforma dlya razrabotki nauchnykh informatsionnykh resursov i onlainovykh servisov* [Socionet as a platform for development of scientific information resources and online services]. *Elektron. b-ki [Digital library]*. 2003. Vol. 6, iss. 1. URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (accessed: 25.11.2006).

Demografiya. Oficial'naja statistika [Demography. Official statistics]. *Federal'naja sluzhba gosudarstvennoj statistiki [Federal state statistics service]*. URL: <http://www.gks.ru/> (accessed: 25.12.2015).

Ссылки на электронные ресурсы на CD-ROM

Государственная Дума, 1999–2003 [Электронный ресурс]: электронная энциклопедия / Аппарат Гос. Думы Федер. Собрания Рос. Федерации. М., 2004. 1 CD-ROM.

В транслитерированном списке литературы:

Gosudarstvennaya Duma, 1999–2003 [State Duma, 1999–2003]. Electronic encyclopedia. The office of the State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation. Moscow, 2004. 1 CD-ROM.

TABLE OF CONTENTS

HYDROPHYSICS. HYDROGEOLOGY

G. E. Zdorovenova, R. E. Zdorovenov, N. I. Palshin, T. V. Efremova, G. G. Gavrilenko, S. R. Bogdanov, A. Yu. Terzhevik. THERMAL REGIME OF A SHALLOW LAKE IN WINTER	3
Yu. V. Karpechko. LOGGING EFFECTS ON RUNOFF FROM THE FORESTED PART OF THE CATCHMENT OF LAKE ONEGA	13
N. A. Diansky, V. V. Fomin, T. Yu. Vyruchalkina, A. V. Gusev. NUMERICAL SIMULATION OF THE CASPIAN SEA CIRCULATION USING THE MARINE AND ATMOSPHERIC RESEARCH SYSTEM	21

HYDROCHEMISTRY OF WATERS AND BOTTOM SEDIMENTS

P. A. Lozovik, G. S. Borodulina, Yu. V. Karpechko, S. A. Kondratyev, A. V. Litvinenko, I. A. Litvinova. NUTRIENT LOAD ON LAKE ONEGO ACCORDING TO FIELD DATA	35
D. V. Ivanov, I. I. Ziganshin, E. V. Osmelkin, R. R. Khasanov. THE CHARACTERISTICS OF SEDIMENTATION PROCESSES IN SOBAKINO LAKES SYSTEM	53

RESEARCH METHODS

A. V. Starovoytov, M. Yu. Tokarev, A. L. Marchenko, D. A. Subetto, A. E. Rybalko, M. I. Aleshin. GPR POTENTIAL WHEN INVESTIGATING QUATERNARY DEPOSITS IN LAKES OF KARELIA	62
V. V. Menshutkin, N. N. Filatov. A MODEL OF UNDER-ICE ECOLOGICAL SYSTEM OF A LARGE LAKE BASED ON THE APPLICATION OF CELLULAR AUTOMATA	76

PALEOLIMNOLOGY

T. S. Shelekhova, D. A. Subetto. DIATOMS IN THE BOTTOM SEDIMENTS OF ZAONEZHYE LAKES: ASSESSMENT OF THE PRESENT STATE OF THE LAKES AND RECONSTRUCTION OF LAKE ONEGO LEVEL VARIATIONS	88
A. N. Tolstobrova, D. S. Tolstobrov, V. V. Kolka, O. P. Korsakova. LATE GLACIAL AND POSTGLACIAL HISTORY OF LAKE OSINOVOYE (KOLA REGION) INFERRED FROM SEDIMENTARY DIATOM ASSEMBLAGES	106

CHRONICLE

In honour of the 25 th anniversary of the Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre RAS	117
--	-----

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS	126
--------------------------------	-----

Научное издание

**Труды Карельского научного центра
Российской академии наук**
№ 5, 2016

Серия ЛИМНОЛОГИЯ

*Печатается по решению
Президиума Карельского научного центра РАН*

Выходит 12 раз в год

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-48848 от 02.03.2012 г.
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций

Редактор А. И. Мокеева
Компьютерная верстка Г. О. Предтеченский

Подписано в печать 13.05.2016. Дата выхода 31.05.2016. Формат 60x84^{1/8}.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 14,5. Усл. печ. л. 15,3.
Тираж 200 экз. Заказ 355. Цена свободная

Учредитель и издатель: Карельский научный центр РАН, 185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11

Оригинал-макет: Редакция научного издания «Труды КарНЦ РАН»

Типография: Редакционно-издательский отдел КарНЦ РАН
185003, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, 50