

## ГИДРОФИЗИКА. ГИДРОЛОГИЯ

УДК 556.556.2:556.045

### **БАЗА ДАННЫХ «ТЕЧЕНИЯ В МЕЛКОВОДНОМ ОЗЕРЕ – 1» И ВОЗМОЖНОСТИ ЕЕ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

**Р. Э. Здравеннов, Н. И. Пальшин, Г. Э. Здравеннова,  
А. В. Митрохов, А. Ю. Тержевик**

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

Результаты длительных измерений скоростей течений в зимние месяцы 1994–1997, 1999 и 2002 гг., полученные в ходе экспедиций лаборатории гидрофизики ИВПС КарНЦ РАН в небольшом мелководном озере Вендюрском, расположенном в южной части Карелии, были обобщены в виде базы данных «Течения в мелководном озере – 1» (свидетельство о гос. регистрации № 2018621066 от 13 июля 2018 г.). База содержит сведения о батиметрии озера, а также данные трех типов: вертикальные профили скоростей средних течений на станциях центральной котловины, длительные измерения скоростей в течение 1,5–7 суток и краткосрочные измерения в течение 3–17 ч на разных глубинах в разных районах озера с дискретностью 1–30 секунд. Общее количество станций измерений – 15 (их расположение показано на схеме озера), количество серий измерений – более 200. Также в базе данных содержатся сведения о температуре воды на горизонтах, на которых устанавливались измерители течений, и результаты измерений вертикальных и горизонтальных смещений льда. Представлено описание уникальных приборов, разработанных в ИВПС КарНЦ РАН, с помощью которых проводились измерения течений. База данных представляет собой набор связанных гиперссылками web-страниц, созданных на языке HTML. Структура базы позволяет строить разнообразные запросы для анализа течений мелководного озера в зимний период. Таким образом, основная функция базы – это обеспечение возможности анализа течений в малом озере в период ледостава на основе данных наблюдений. База данных может быть использована в научных целях гидрологами, гидрофизиками, а также в учебных целях как наглядный материал в географических и гидрометеорологических вузах.

**Ключевые слова:** база данных; мелководное озеро; течения; период ледостава; смещения льда.

**R. E. Zdorovenov, N. I. Palshin, G. E. Zdorovennova, A. V. Mitrokhov,  
A. Yu. Terzhevik. DATABASE “CURRENTS IN A SHALLOW LAKE – 1” AND  
ITS POTENTIAL APPLICATIONS**

The results of long-term measurements of the velocities of currents during the ice seasons of 1994–1997, 1999 and 2002, obtained during expeditions of the Laboratory

of Hydrophysics, NWPI KarRC RAS to small shallow Lake Vendyurskoe (southern Karelia) have been summarized in the database “Currents in a shallow lake – 1” (Certificate of state registration № 2018621066, date of registration July 13, 2018). The database contains information on the bathymetry of the lake; the locations of measurement stations are mapped. The database contains three types of data: vertical profiles of current velocities at stations in the central basin, long-term measurements of velocities for 1.5–7 days, and short-term measurements for 3–17 hours at different depths in different parts of the lake with a time interval of 1–30 seconds. The total number of measurement stations is 15, the number of measurement series is more than 200. Also, the database contains data on water temperature at the depths of current measurements, and observations of vertical and horizontal ice displacements. A description of the instruments with which the measurements were performed is provided. The database is a set of hyper-linked web pages created in HTML. The structure of the database allows constructing various queries for the analysis of lake currents during the winter period. Its main function is to analyze currents in a small lake during the ice-covered period. The database can be used for scientific purposes by hydrologists, hydrophysicists, or as visual learning aid at geographical and hydrometeorological universities.

**Key words:** database; shallow lake; currents; ice season; ice displacement.

## Введение

Гидродинамика покрытых льдом озер до настоящего времени остается недостаточно изученной областью лимнологии. Течения, возникающие в малопроточных озерах в зимний период, обусловлены рядом факторов, из которых важнейшими являются теплообмен с донными отложениями, атмосферное воздействие на лед, а также проникающая под лед солнечная радиация [Bengtsson, 1996; Malm et al., 1998; Kirillin et al., 2012].

Неравномерное распределение тепла в донных отложениях между мелководными и глубоководными частями водоема приводит к появлению в зимний период горизонтальных неоднородностей плотности и формированию циркуляций, охватывающих практически весь объем водной массы [Raft, 1985; Malm, 1998; Пальшин и др., 2016]. Возникающие склоновые течения и компенсационные восходящие токи играют важную экологическую роль, способствуя перераспределению взвешенных и растворенных веществ, активизируя тепло- и массообмен на границе «вода-дно», определяя интенсивность поглощения кислорода, высвобождая накопленные в верхнем слое донных отложений биогены, парниковые газы. Данные измерений температуры и электропроводности воды [Бояринов и др., 2003], а также масштабные оценки и расчеты [Пальшин и др., 2017] показывают, что в небольших озерах зимой может формироваться антициклонический круговорот, охватывающий практически всю водную толщу и существующий на протяжении нескольких месяцев. Анализ уравнений движения показывает, что члены

локального ускорения, диффузии и адвекции в основной толще озера на два порядка меньше, чем вклад силы Кориолиса и горизонтального градиента давления [Malm et al., 1998; Пальшин и др., 2017]. Таким образом, формирующаяся циркуляция имеет геострофический характер.

В зимний период в озерах, наряду с крупномасштабными циркуляциями, формируются мезомасштабные пространственные неоднородности в распределении температуры, локальные вихри [Forrest et al., 2013], которые могут приводить, в частности, к уменьшению толщины льда [Kourgaev et al., 2016] и создавать, таким образом, потенциальную опасность для транспортных перевозок по льду.

Атмосферное воздействие на водоемы зимой заключается преимущественно в образовании снежно-ледяного покрова и изменении его толщины и структуры. Однако синхронные измерения скоростей течений, скорости ветра и перепадов атмосферного давления над небольшим покрытым льдом озером Вендюрским показали, что усиления ветра являются наиболее вероятной причиной, генерирующей колебательные движения водной толщи [Петров и др., 2007]. Длительные измерения температуры в этом же озере в зимний период позволили установить, что на фоне усиления атмосферного воздействия (резких перепадов атмосферного давления и усиления ветра над акваторией водоема) происходит интенсификация подледной гидродинамики и ускорение теплообмена в придонных слоях [Здоровеннова и др., 2016].

В весенний период, по мере таяния снега и уменьшения альбедо поверхности, растает

поток солнечной радиации, проникающей под лед. Развивающееся конвективное перемешивание достигает значительных глубин [Farmer, 1975; Bouffard et al., 2016]. Конвективное перемешивание играет важнейшую роль в перераспределении растворенных (газы, биогенные вещества) и взвешенных (клетки водорослей) веществ в конце зимнего сезона [Kelley, 1997; Тержевик и др., 2010]. Исследования радиационного режима малого озера в период весенней подледной конвекции позволили выявить заметную вариабельность альбедо его поверхности [Петров и др., 2005], что наряду с пространственной неоднородностью толщины снежно-ледяного покрова может создавать предпосылки для неравномерного подледного прогрева и формирования вихревых структур.

В небольших озерах, покрытых льдом, скорости течений невелики – не превышают нескольких миллиметров в секунду [Bengtsson et al., 1996; Malm et al., 1998; Rizk et al., 2014; Kirillin et al., 2015]. Поскольку период ледостава продолжается на водоемах умеренной зоны около полугода, влияние подледных течений на термический и химико-биологический режимы водоемов достаточно велико, что определяет актуальность исследований динамики водоемов, покрытых льдом.

До настоящего времени прямые измерения течений на водоемах, покрытых льдом, были крайне малочисленны. Связано это в первую очередь с высокой стоимостью высокочувствительного измерительного оборудования, необходимого для проведения таких исследований.

Описанные в данной работе прямые длительные измерения течений проводились на покрытом льдом мелководном озере Вендюрском (юг Карелии) в 1994–1997, 1999 и 2002 гг. При измерениях использовались уникальные приборы, разработанные в Институте водных проблем Севера КарНЦ РАН [Glinsky, 1998]. Предварительные результаты анализа измерений течений были опубликованы в виде технических отчетов [Malm et al., 1996, 1997] и статей в ведущих отечественных и зарубежных журналах [Bengtsson et al., 1996; Malm et al., 1998; Петров и др., 2007].

Для того чтобы обобщить данные многолетних прямых измерений течений в озере, покрытом льдом, и сделать их доступными для широкого круга специалистов, была создана и запатентована база данных по подледной гидродинамике озера Вендюрского. База данных «Течения в мелководном озере – 1» прошла государственную регистрацию (свидетельство о государственной регистрации № 2018621066

от 13 июля 2018 г.). Характеристики базы: тип ЭВМ IBM PC, СУБД Excel, интернет-браузеры Mozilla Firefox, Google Chrome, Opera, Internet Explorer, ОС: Windows, объем 65 Мб.

База данных может использоваться при изучении сезонной изменчивости динамического режима озера, покрытого льдом. Создание такой базы данных является важной и актуальной задачей, поскольку информационный поиск на сайте ФИПС (<http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS>) показал, что в настоящее время нет зарегистрированных баз данных по прямым измерениям течений в мелководных озерах, покрытых льдом.

## Материалы и методы

**Объект исследования.** Измерения проводились в зимние месяцы на небольшом мезотрофном озере Вендюрском, расположенном в южной части Карелии (62°10'–62°20'N, 33°10'–33°20'E) (рис. 1). Озеро Вендюрское является типичным представителем класса озер водно-ледникового происхождения, широко распространенных на территории Фенноскандии [Тержевик и др., 2010]. Площадь зеркала озера 10,4 км<sup>2</sup>, объем вод ~ 5,5·10<sup>7</sup> м<sup>3</sup>, средняя глубина 5,3 м, максимальная 13,4 м, площадь водосборного бассейна 82,8 км<sup>2</sup>. Коэффициент водообмена около 0,4 год<sup>-1</sup>. Прозрачность воды по диску Секки 3–4 м. Песчаные донные отложения преобладают на глубинах до 2–3 м, глубже распространены илы, достигающие метровой толщины в центральной котловине озера. Начало ледостава на озере происходит с первой недели ноября до 20-х чисел декабря, разрушение ледового покрова и освобождение акватории от плавающего льда – в период с 30 апреля по 20 мая, продолжительность ледостава изменяется в пределах 5–6 месяцев [Петров и др., 2006; Zdrovennov et al., 2013]. Толщина снежно-ледяного покрова достигает к концу марта ~ 0,6–0,7 м [Петров и др., 2005; Здровеннов и др., 2010; Zdrovennova et al., 2013].

**Методика измерений.** Измерения течений, а также вертикальных и горизонтальных смещений льда проводились на 15 станциях двух поперечных разрезов (рис. 1). При измерениях использовались приборы, изготовленные в Институте водных проблем Севера КарНЦ РАН А. М. Глинским [Glinsky, 1998]: измерители течений ACM (Acoustic current meter), DWCM (Drag wire current meter) и НТСМ (Hot Thermistor current meter) и измерители смещений льда (Vertical ice displacement meter и Horizontal ice displacement meter). Диапазон измерений, точ-

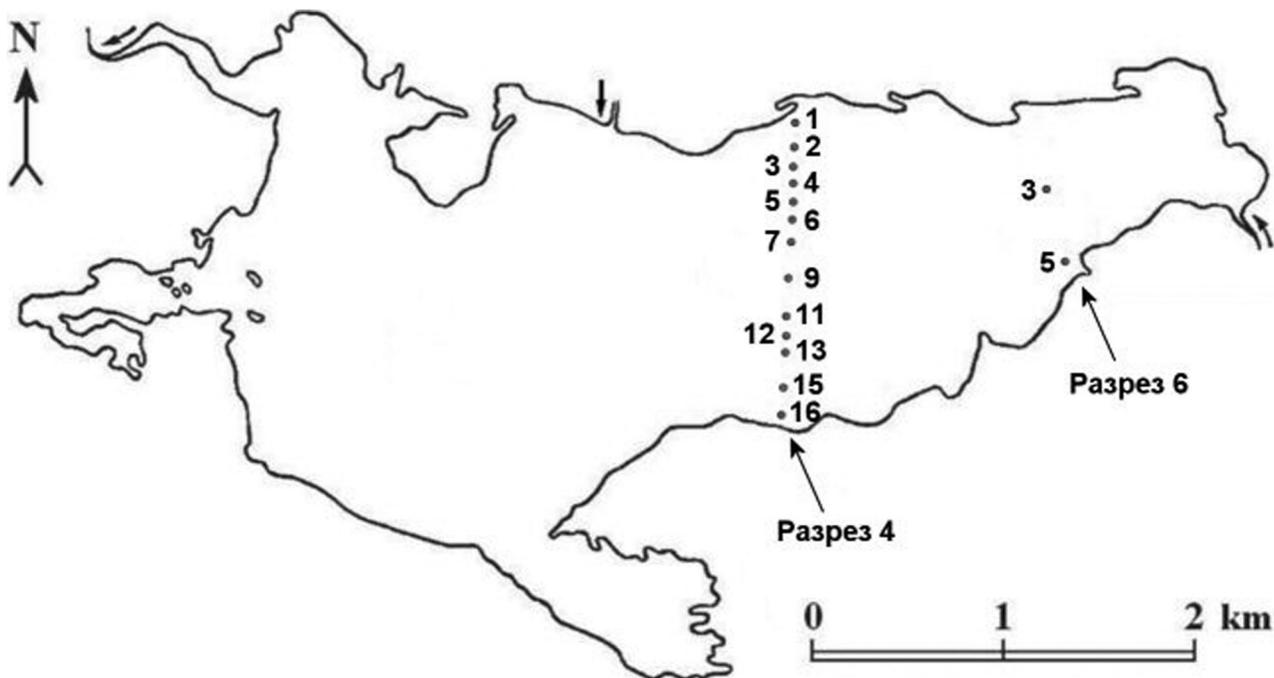


Рис. 1. Положение станций измерения течений на оз. Вендюрском в 1994–1997, 1999 и 2002 гг.  
 Fig. 1. Position of the stations for current measurement in Lake Vendyurskoe in 1994–1997, 1999 and 2002

Диапазон, точность и разрешающая способность приборов, использовавшихся для измерения течений и смещений льда

The range, accuracy and resolution of the devices used to measure the currents and ice displacement

Прибор Devices	Диапазон Range	Точность Accuracy	Разрешение Resolution
Акустический измеритель скорости Acoustic current meter (ACM)	Две компоненты скорости от -7 до +7 см/с Two velocity components from -7 to +7 cm/s	±50 %	0,02 см/с 0,02 cm/s
Волосковый измеритель скорости Drag wire current meter (DWCM)	Две компоненты скорости от -2 до +2 см/с Two velocity components from -2 to +2 cm/s	25 %	0,0003 см/с 0,0003 cm/s
Термисторный измеритель скорости Hot thermistor current meter (HTCM)	Скорость от 0,03 до 10 см/с Температура от 0 до 20 °С Velocity from 0,03 to 10 cm/s Temperature from 0 to 20 °C	±30 % 0,2 °C	1 % 0,0002 °C
Измеритель вертикальных смещений льда Vertical ice displacement meter	Вертикальное смещение льда от -10 до +10 см Vertical ice displacement from -10 to +10 cm	0,2 мм 0,2 mm	0,002 мм 0,002 mm
Измеритель горизонтальных смещений льда Horizontal ice displacement meter	Горизонтальное смещение льда от -15 до +15 см Horizontal ice displacement from -15 to +15 cm	1,0 мм 1,0 mm	0,01 мм 0,01 mm

ность и разрешающая способность приборов приведены в таблице.

Измерения течений выполнялись в трех режимах: 1) вертикальные профили средних течений на станциях 4-го и 6-го разрезов; 2) длительные измерения течений на одном горизонте в течение 1,5–7 суток на станциях 4-го и 6-го разрезов; 3) краткосрочные измерения

течений продолжительностью 3–17 ч на разных горизонтах на станциях 4-го разреза. Дискретность измерений составляла от 1–30 секунд до одной минуты. Общее количество станций измерений – 15, количество серий измерений – более 200. Приборы фиксировали две компоненты течения, по которым затем вычислялись его модуль и направление.

Получение вертикальных профилей средних течений проводилось с использованием прибора АСМ по специально разработанной методике, описанной в работе [Malm et al., 1998]. На каждой станции измерения осуществлялись последовательно на нескольких горизонтах. Продолжительность измерений на каждом горизонте составляла около 30 минут. Выбранный период измерений был близок к теоретически оцененному максимальному периоду первой моды продольной баротропной сейши озера Вендюрского [Bengtsson et al., 1996]. Для устранения возможной ошибки, связанной с дрейфом приборного нуля, акустический измеритель течений АСМ в середине периода измерений поворачивали вокруг своей оси на 180 градусов. Из полученных в двух полупериодах значений вычислялось среднее для каждой компоненты, а затем модуль и направление средней скорости.

На отдельных станциях параллельно с измерениями течений фиксировалась температура воды на тех же горизонтах, а также вертикальные и горизонтальные смещения льда.

#### **База данных «Течения в мелководном озере – 1»**

**Структура.** База данных представляет собой набор связанных гиперссылками веб-страниц, созданных на языке HTML. На главной странице базы на вкладке «Главная» содержится навигация по базе, а также открывается доступ к шести вкладкам, содержащим данные по батиметрии озера и особенностям его ледового режима (вкладка «Вендюрское»), фотографии поверхности озера (вкладка «Фото»), информацию об использовавшихся приборах (вкладка «Приборы»), данные измерений течений и по положению станций (вкладка «Данные»), сведения о публикациях, содержащих результаты анализа данных и описание использовавшихся приборов (вкладка «Публикации») и контактную информацию (вкладка «Контакты»).

**Работа с базой данных.** На вкладке «Данные» находится схема положения станций измерений, а также таблица, содержащая информацию о режиме и датах измерений, станциях, измеряемых параметрах. На каждый набор данных дается гиперссылка, по которой можно скачать файл с данными в формате MS Excel. Дальнейший анализ данных может проводиться в среде MS Excel либо в других программах, предназначенных для анализа данных.

**Анализ длительных измерений течений, температуры, смещений льда.** На рис. 2 в качестве примера приведена выборка двух

компонент скорости течения, полученных в режиме длительных измерений на станции 3 разреза 4 (глубина станции 7,7 м) на глубине 1,2 м в период 17–24 апреля 1995 г. Анализ данных позволяет заключить, что обе компоненты скорости характеризовались выраженной изменчивостью, как низко-, так и высокочастотной.

Низкочастотная изменчивость компонент скорости (от нескольких часов до нескольких десятков часов) была связана, по всей видимости, с крупномасштабной циркуляцией в озере либо с атмосферным воздействием на лед. Как было показано в ходе специально спланированных экспериментов на озере Вендюрском в марте 1996 г. [Malm et al., 1998; Петров и др., 2007], при усилении ветра и перепадах атмосферного давления над акваторией озера усиливались колебания ледового покрова и происходила интенсификация течений подо льдом.

Высокочастотная изменчивость компонент скорости была обусловлена сейшевой активностью – преобладали колебания с периодами 6–10 и 25–30 минут, что близко к теоретическим оценкам первых мод поперечной и продольной баротропной сейши озера Вендюрского. На рис. 2, б в период с 19 до 24 ч 17 апреля хорошо прослеживается увеличение и уменьшение амплитуды колебаний компонент с периодом первой моды продольной сейши. Интересно, что колебания с периодом, близким к первой моде поперечной сейши, не исчезли на фоне усиления продольной сейши.

Построение точечных и прогрессивно-векторных диаграмм позволяет получать представление о преобладающем переносе в определенный период зимы в определенном районе озера, а также изучать характер течений, его изменения во времени. Примеры таких диаграмм приведены в работах [Malm et al., 1998; Петров и др., 2007], где, в частности, показано, что в период слабых движений в озере наблюдается преимущественно перенос по продольной оси озера, а при интенсификации движений усиливается роль поперечной компоненты, в результате чего направление основного переноса смещается. Кроме этого, отмечена такая особенность, как резкая смена направления течения на угол порядка 90 градусов несколько раз в течение суток в период весенней подледной конвекции.

Совместный анализ данных по течениям и вертикальным смещениям льда (рис. 3) позволяет заключить, что периоды колебаний льда и течений были близки к теоретической оценке первой моды продольной баротропной сейши оз. Вендюрского. Отчетливо наблюдался сдвиг

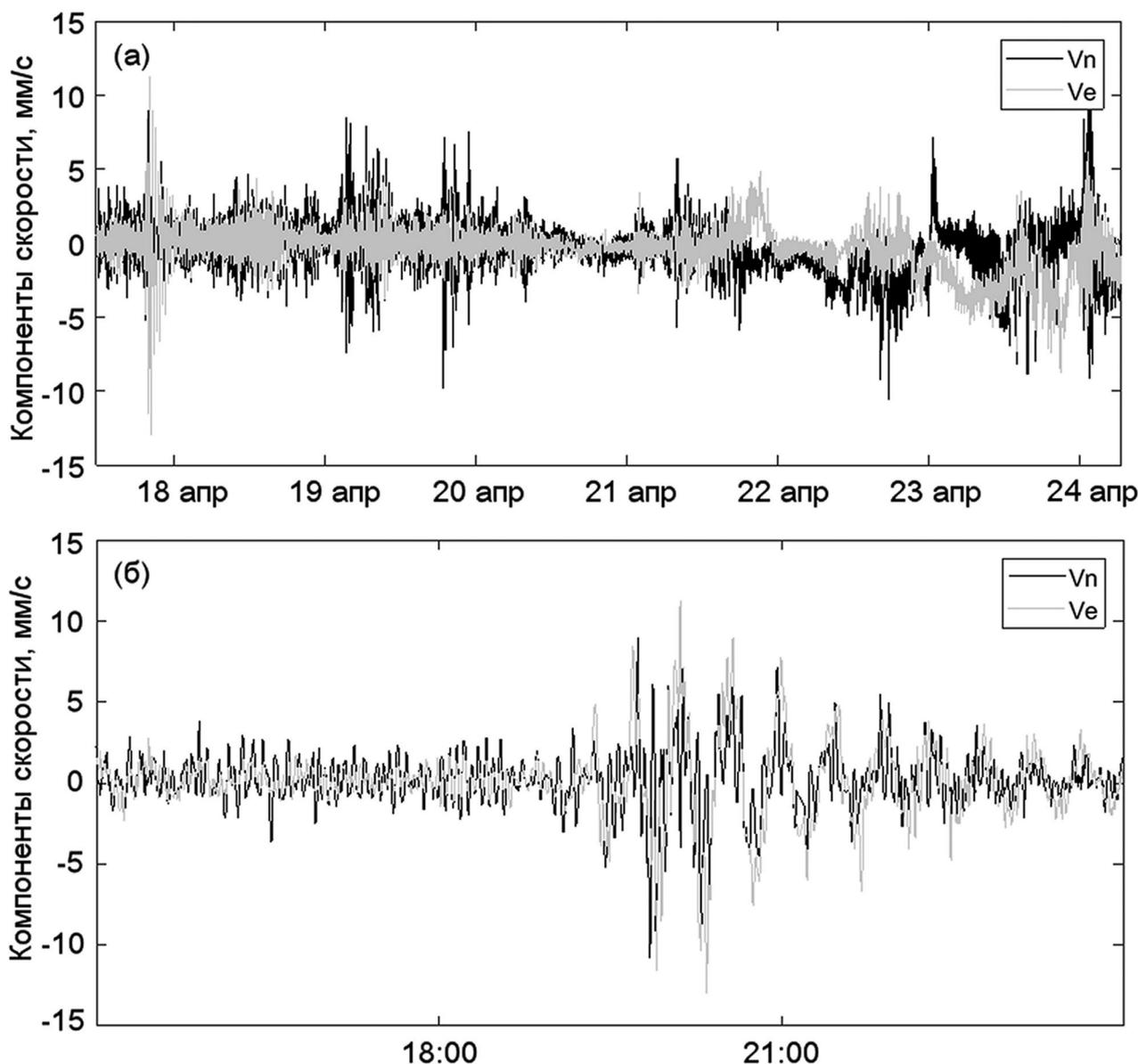


Рис. 2. Компоненты скорости течения, измеренные с помощью прибора DWCM на станции 3 разреза 4 на глубине 1,2 м (глубина станции 7,7 м): (а) 17–24 апреля 1995 г., (б) в период с 15.00 до 23.59 17 апреля 1995 г.

Fig. 2. Velocity components measured with the DWCM at station 3 of the 4th section at a depth of 1.2 m (the depth of the station is 7.7 m): (a) April 17–24, 1995, (b) from 15.00 to 23.59 April 17, 1995

по фазе между колебаниями льда и компонент течений. Как показано в работах [Malm et al., 1998; Петров и др., 2007], фазовый сдвиг между колебаниями течений и льда составляет около четверти периода, что согласуется с теорией сейш.

Совместный анализ данных по течениям и температуре воды в период развития весенней подледной конвекции (рис. 4) наглядно демонстрирует суточную изменчивость течений – интенсификацию в дневные часы на фоне роста температуры и заметное уменьшение амплитуды колебаний течений ночью.

**Анализ вертикальной структуры течений.** На рис. 5 в качестве примера приведены вертикальные профили средней скорости течения на трех станциях 4-го разреза, измеренные в декабре 1994 г. и марте 1995 г. Анализ вертикальных профилей позволяет заключить, что (1) максимальные скорости течений наблюдались на глубинах порядка 2–3 м на всех станциях измерений, (2) скорости течений в начале зимы (рис. 5, а) были заметно больше, чем в конце (рис. 5, б).

Таким образом, созданная база, содержащая обширный массив данных по течениям,

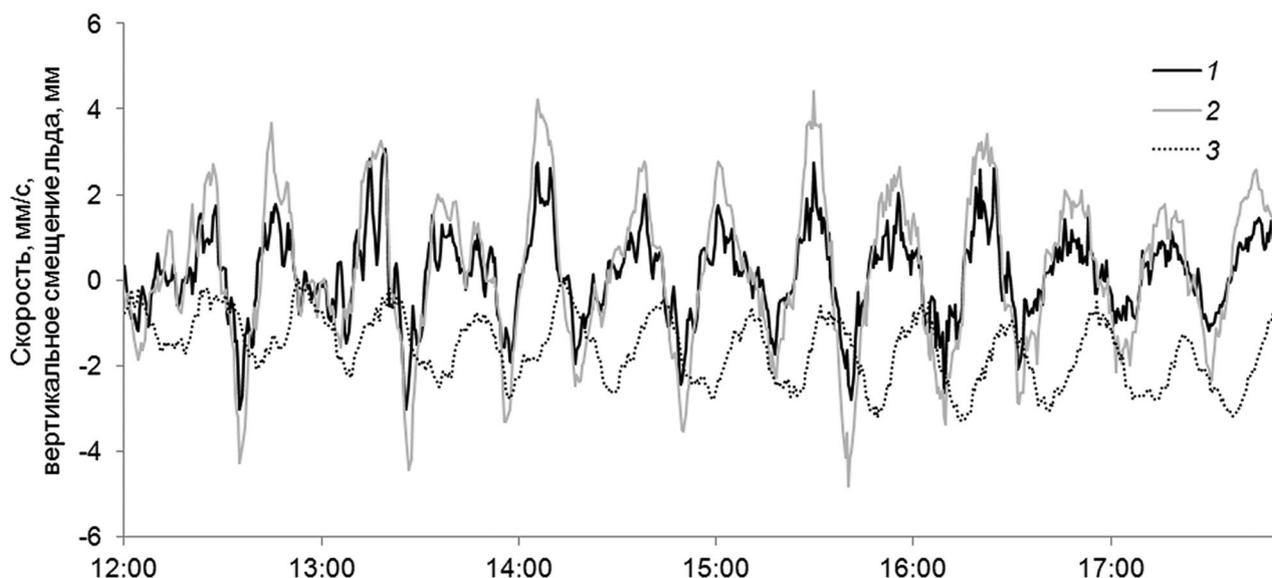


Рис. 3. Компоненты скорости течения и вертикальные смещения льда, измеренные на глубине 2 м на станции 3 разреза 6 (глубина станции 5 м) 23 марта 1995 г. с использованием приборов DWCM и Vertical ice displacement meter:

1 – северная компонента, 2 – восточная компонента, 3 – вертикальные смещения льда

Fig. 3. Velocity components and vertical ice displacement, measured at a depth of 2 m at station 3 of the 6th section (the station depth is 5 m) on March 23, 1995 using DWCM and Vertical ice displacement meter:

1 – Northern component, 2 – Eastern component, 3 – vertical displacement of ice

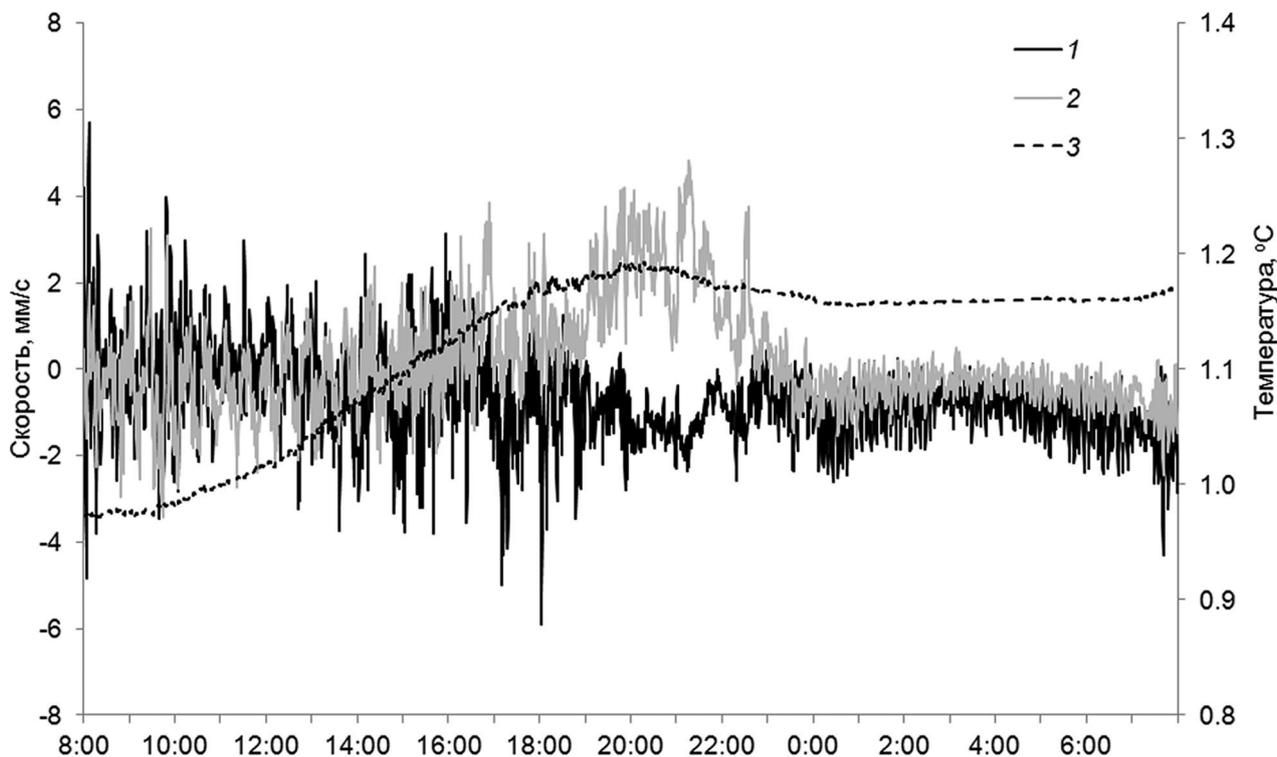


Рис. 4. Компоненты скорости течения и температура воды, измеренные на глубине 1,3 м на станции 3 разреза 4 21–22 апреля 1995 г. с использованием приборов DWCM и Hot thermistor current meter:

1 – северная компонента, 2 – восточная компонента, 3 – температура воды

Fig. 4. Velocity components and water temperature, measured at a depth of 1.3 m at station 3 of the 4th section, April 21–22, 1995 using DWCM and Hot thermistor current meter:

1 – Northern component, 2 – Eastern component, 3 – water temperature

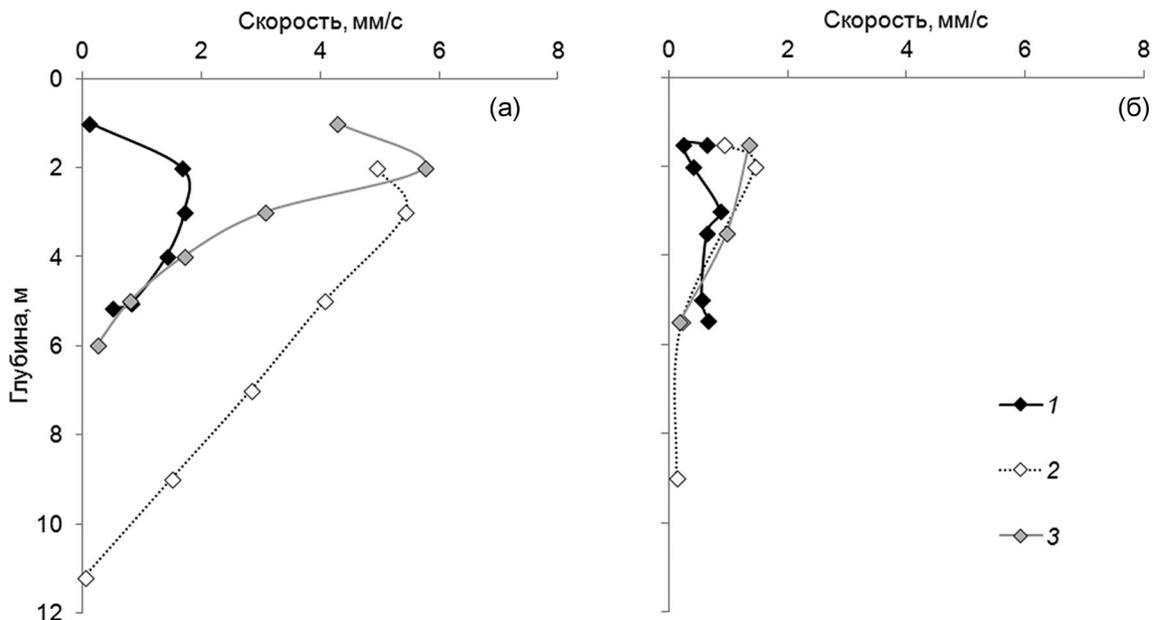


Рис. 5. Скорости течения, измеренные на станциях 4-го разреза (а) 21–24 декабря 1994 г., (б) 14–18 марта 1995 г.:

1 – станция 2, 2 – станция 9, 3 – станция 15

Fig. 5. Current velocities measured at the stations of the 4th section (a) December 21–24, 1994, (b) March 14–18, 1995:

1 – station 2, 2 – station 9, 3 – station 15

температуре воды и смещениям льда в небольшом озере, покрытом льдом, может быть использована широким кругом специалистов при изучении динамики озера в период зимней стагнации, весенней подледной конвекции, в моделях ледяного покрова, а также в учебных целях как наглядный материал в географических и гидрометеорологических вузах.

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

## Литература

Бояринов П. М., Митрохов А. В., Пальшин Н. И., Петров М. П., Тержевик А. Ю., Филатов Н. Н. Динамика вод в малом озере в период ледостава // Гидроэкологические проблемы Карелии и использование водных ресурсов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. С. 24–32.

Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э., Тержевик А. Ю. Межгодовая изменчивость снежно-ледового покрова озера Вендюрского // Актуальные проблемы экологии: тезисы докл. IV Межд. науч.-практ. конф. (Гродно, Беларусь, 27–29 октября 2010 г.). Гродно: ГрГУ, 2010. С. 229–231.

Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э., Пальшин Н. И., Ефремова Т. В., Гавриленко Г. Г., Бог-

данов С. Р., Тержевик А. Ю. Тепловой режим мелководного озера зимой // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 5. С. 3–12. doi: 10.17076/lim314

Пальшин Н. И., Ефремова Т. В., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э. Перенос тепла в малом озере в период ледостава // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 9. С. 17–26. doi: 10.17076/lim355

Пальшин Н. И., Здоровеннова Г. Э., Богданов С. Р., Волков С. Ю., Гавриленко Г. Г., Ефремова Т. В., Здоровеннов Р. Э., Тержевик А. Ю. Геоэстрофические течения в малом озере подо льдом // Успехи современного естествознания. 2017. № 11. С. 89–94.

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

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

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

Тержевик А. Ю., Пальшин Н. И., Голосов С. Д., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э., Митрохов А. В., Потахин М. С., Шипунова Е. А., Зверев И. С. Гидрофизические аспекты формирования кислородного режима мелководного озера, покрытого льдом // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 5. С. 568–579.

Bengtsson L. Mixing in ice covered lakes // Hydrobiologia. 1996. Vol. 322. P. 91–97.

Bengtsson L., Malm J., Terzhevik A., Petrov M., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N. Field investigation of Winter thermo- and hydrodynamics in a small Karelian lake // *Limnology and Oceanography*. 1996. Vol. 41. P. 1502–1513.

Bouffard D., Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E., Pasche N., Wüest A., Terzhevik A. Y. Ice-covered Lake Onega: effects of radiation on convection and internal waves // *Hydrobiologia*. 2016. Vol. 780(1). P. 21–36. doi: 10.1007/s10750-016-2915-3

Farmer D. M. Penetrative convection in the absence of mean shear // *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1975. Vol. 101. P. 869–891. doi: 10.1002/qj.49710143011

Forrest A. L., Laval B. E., Pieters R., Lim D. S. S. A cyclonic gyre in an ice-covered lake // *Limnology and Oceanography*. 2013. Vol. 58(1). P. 363–375. doi: 10.4319/lo.2013.58.1.0363

Glinsky A. Current meters for measurement of low-speed velocities in ice covered lakes // *Limnology and Oceanography*. 1998. Vol. 43. P. 1661–1668.

Kelley D. E. Convection in ice-covered lakes: effects on algal suspension // *J. Plankt. Res.* 1997. Vol. 19. P. 1859–1880.

Kirillin G., Leppäranta M., Terzhevik A., Granin N., Bernhardt J., Engelhardt Ch., Efremova T., Golosov S., Palshin N., Sherstyankin P., Zdorovenova G., Zdorovenov R. Physics of seasonally ice-covered lakes: a review // *Aquatic Sciences*. 2012. Vol. 74(4). P. 659–682. doi: 10.1007/s00027-012-0279-y

Kirillin G. B., Forrest A. L., Graves K. E., Fischer A., Engelhardt C., Laval B. E. Axisymmetric circulation driven by marginal heating in ice-covered lakes // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42, no. 8. P. 2893–2900. doi: 10.1002/2014GL062180

Kouraev A. V., Zakharova E. A., Remy F., Kostianoy A. G., Shimaraev M. N., Hall N. M. J., Suknev A. Ya. Giant ice rings on lakes Baikal and Hovsgol: Inventory, associated water structure and potential formation mechanism // *Limnology and Oceanography*. 2016. Vol. 61(3). P. 1001–1014. doi: 10.1002/lno.10268

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., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. A field study of Thermo- and Hydrodynamics in three Small Karelian Lakes during winter 1994/1995 / Department of Water Resources Engineering. Institute of Technology. University of Lund, 1996. No. 3197. 220 p.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky 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.

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

Rahm L. The Thermally Forced Circulation in a Small, Ice-Covered Lake // *Limnology and Oceanography*. 1985. Vol. 30. P. 1122–1128.

Rizk W., Kirillin G., Leppäranta M. Basin-scale circulation and heat fluxes in ice-covered lakes // *Limnology and Oceanography*. 2014. Vol. 59(2). P. 445–464. doi: 10.4319/lo.2014.59.02.0445

Zdorovenov R., Palshin N., Zdorovenova G., Efremova T., Terzhevik A. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake // *Est. J. Earth Sci.* 2013. Vol. 61(1). P. 26–32. doi: 10.3176/earth.2013.03

Zdorovenova G., Zdorovenov R., Palshin N., Terzhevik A. Optical properties of the ice cover on Vendyurskoe lake, Russian Karelia (1995–2012) // *Ann Glaciol.* 2013. Vol. 54(62). P. 121–124. doi: 10.3189/2013AoG62A179

Поступила в редакцию 27.04.2018

## References

Boyarinov P. M., Mitrokhov A. V., Pal'shin N. I., Petrov M. P., Terzhevik A. Yu., Filatov N. N. Dinamika vod v malom ozere v period ledostava [Dynamics of water in a small lake during the freeze-up period]. *Gidroekol. probl. Karelii i ispol'zovanie vodn. resursov* [Hydroecol. probl. of Karelia and use of water resources]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2003. P. 24–32.

Pal'shin N. I., Efremova T. V., Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E. Perenos tepla v malom ozere v period ledostava [Heat transfer in an ice-covered small lake]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2016. No. 9. P. 17–26. doi: 10.17076/lim355

Pal'shin N. I., Zdorovenova G. E., Bogdanov S. R., Volkov S. Yu., Gavrilenko G. G., Efremova T. V., Zdorovenov R. E., Terzhevik A. Yu. Geostroficheskie techeniya v malom ozere podo l'dom [Geostrophic currents in the small ice-covered lake]. *Uspekhi sovr. estestvoznaniya* [Advances in Current Nat. Sci.] 2017. No. 11. P. 89–94.

Petrov M. P., Terzhevik A. Yu., Pal'shin N. I., Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E. Absorption of solar

radiation by snow-and-ice cover of lakes. *Water Resources*. 2005. Vol. 32, no. 5. P. 496–504.

Petrov M. P., Terzhevik A. Yu., Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E. The thermal structure of a shallow lake in early winter. *Water Resources*. 2006. Vol. 33, no. 2. P. 135–143.

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

Terzhevik A. Yu., Pal'shin N. I., Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E., Mitrokhov A. V., Potakhin M. S., Golosov S. D., Shipunova E. A., Zverev I. S. Hydrophysical aspects of oxygen regime formation in a shallow ice-covered lake. *Water Resources*. 2010. Vol. 37, no. 5. P. 662–673.

Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E., Terzhevik A. Yu. Mezhgodovaya izmenchivost' snezhnoledovogo pokrova ozera Vendyurskogo [Interannual variability of the snow-ice cover of Lake Vendyurskoe]. *Aktual'nye probl. ekol.: tezisy dokl. IV Mezhdunar.*

nauch.-prakt. konf. (Grodno, Belarus', 27–29 oktyabrya 2010 g.) [Topical probl. of ecol.: Proceed. IV Int. Scientific-Practical. Conf. (Grodno, Belarus, Oct. 27–29, 2010)]. Grodno: GrGU, 2010. P. 229–231.

Zdorovennova G. E., Zdorovennov R. E., Palshin N. I., Efremova T. V., Gavrilenko G. G., Bogdanov S. R., Terzhevik A. Yu. Teplovoi rezhim melkovodnogo ozera zimoi [Thermal regime of a shallow lake in winter]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2016. No. 5. P. 3–12. doi: 10.17076/lim314

Bengtsson L. Mixing in ice covered lakes. *Hydrobiologia*. 1996. Vol. 322. P. 91–97.

Bengtsson L., Malm J., Terzhevik A., Petrov M., Boyarinov P., Glinsky A., Palshin N. Field investigation of Winter thermo- and hydrodynamics in a small Karelian lake. *Limnol. Oceanogr.* 1996. Vol. 41. P. 1502–1513.

Bouffard D., Zdorovennov R. E., Zdorovennova G. E., Pasche N., Wüest A., Terzhevik A. Y. Ice-covered Lake Onega: effects of radiation on convection and internal waves. *Hydrobiologia*. 2016. Vol. 780(1). P. 21–36. doi: 10.1007/s10750-016-2915-3

Farmer D. M. Penetrative convection in the absence of mean shear. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1975. Vol. 101. P. 869–891. doi: 10.1002/qj.49710143011

Forrest A. L., Laval B. E., Pieters R., Lim D. S. S. A cyclonic gyre in an ice-covered lake. *Limnology and Oceanography*. 2013. Vol. 58(1). P. 363–375. doi: 10.4319/lo.2013.58.1.0363

Glinsky A. Current meters for measurement of low-speed velocities in ice-covered lakes. *Limnology and Oceanography*. 1998. Vol. 43. P. 1661–1668.

Kelley D. E. Convection in ice-covered lakes: effects on algal suspension. *J. Plankt. Res.* 1997. Vol. 19. P. 1859–1880.

Kirillin G., Leppäranta M., Terzhevik A., Granin N., Bernhardt J., Engelhardt C., Efremova T., Golosov S., Palshin N., Sherstyankin P., Zdorovennova G., Zdorovennov R. Physics of seasonally ice-covered lakes: a review. *Aquatic Sciences*. 2012. Vol. 74(4). P. 659–682. doi: 10.1007/s00027-012-0279-y

Kirillin G. B., Forrest A. L., Graves K. E., Fischer A., Engelhardt C., Laval B. E. Axisymmetric circulation driven by marginal heating in ice-covered lakes. *Geophys-*

*cal Research Letters*. 2015. Vol. 42, iss. 8. P. 2893–2900. doi: 10.1002/2014GL062180

Kouraev A. V., Zakharova E. A., Remy F., Kostianoy A. G., Shimaraev M. N., Hall N. M. J., Suknev A. Yu. Giant ice rings on lakes Baikal and Hovsgol: Inventory, associated water structure and potential formation mechanism. *Limnology and Oceanography*. 2016. Vol. 61(3). P. 1001–1014. doi: 10.1002/lno.10268

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., Glinsky A., Palshin N., Petrov M. A field study of Thermo- and Hydrodynamics in three Small Karelian Lakes during winter 1994/1995 / Department of Water Resources Engineering, Institute of Technology, University of Lund. 1996. No. 3197. 220 p.

Malm J., Terzhevik A., Bengtsson L., Boyarinov P., Glinsky 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.

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

Rahm L. The Thermally Forced Circulation in a Small, Ice-Covered Lake. *Limnology and Oceanography*. 1985. Vol. 30. P. 1122–1128.

Rizk W., Kirillin G., Leppäranta M. Basin-scale circulation and heat fluxes in ice-covered lakes. *Limnology and Oceanography*. 2014. Vol. 59(2). P. 445–464.

Zdorovennov R., Palshin N., Zdorovennova G., Efremova T., Terzhevik A. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake. *Est. J. Earth Sci.* 2013. Vol. 61, no. 1. P. 26–32. doi: 10.3176/earth.2013.03

Zdorovennova G., Zdorovennov R., Palshin N., Terzhevik A. Optical properties of the ice cover on Vendurskoe lake, Russian Karelia (1995–2012). *Ann. Glaciol.* Vol. 54(62). 2013. P. 121–124. doi: 10.3189/2013AoG62A179

Received April 27, 2018

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Здорovenнов Роман Эдуардович

старший научный сотрудник лаб. гидрофизики, к. г. н. Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр РАН» пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030  
эл. почта: romga74@gmail.com  
тел.: (8142) 576381, +79212209438

## CONTRIBUTORS:

### Zdorovennov, Roman

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences  
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: romga74@gmail.com  
tel.: (8142) 576381, +79212209438

**Пальшин Николай Иннокентьевич**

старший научный сотрудник лаб. гидрофизики, к. г. н.  
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр «Карельский  
научный центр РАН»  
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185030  
эл. почта: npalshin@mail.ru  
тел.: (8142) 576381

**Здоровеннова Галина Эдуардовна**

заведующая лаб. гидрофизики, к. г. н.  
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр «Карельский  
научный центр РАН»  
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185030  
эл. почта: zdorovennova@gmail.com  
тел.: (8142) 576381, +79116660369

**Митрохов Андрей Васильевич**

главный гидролог лаборатории гидрофизики  
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр «Карельский  
научный центр РАН»  
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185030  
эл. почта: romga74@gmail.com  
тел.: (8142) 576381

**Терзевик Аркадий Юрьевич**

ведущий научный сотрудник лаб. гидрофизики, к. т. н.  
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр «Карельский  
научный центр РАН»  
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185030  
эл. почта: ark1948@list.ru  
тел.: (8142) 576381, +79217267356

**Palshin, Nikolai**

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

**Zdorovennova, Galina**

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: zdorovennova@gmail.com  
tel.: (8142) 576381, +79116660369

**Mitrokhov, Andrey**

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: romga74@gmail.com  
tel.: (8142) 576381

**Terzhevik, Arkady**

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: ark1948@list.ru  
tel.: (8142) 576381, +79217267356