

ГИДРОФИЗИКА. ГИДРОЛОГИЯ

УДК 551.46/49:51

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МЕЛКОВОДНОМ БОРЕАЛЬНОМ ОЗЕРЕ: ВЕРИФИКАЦИЯ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ

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

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

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

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

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

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

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

Введение

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

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

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

Объект и методы исследований

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

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

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

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

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

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

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

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

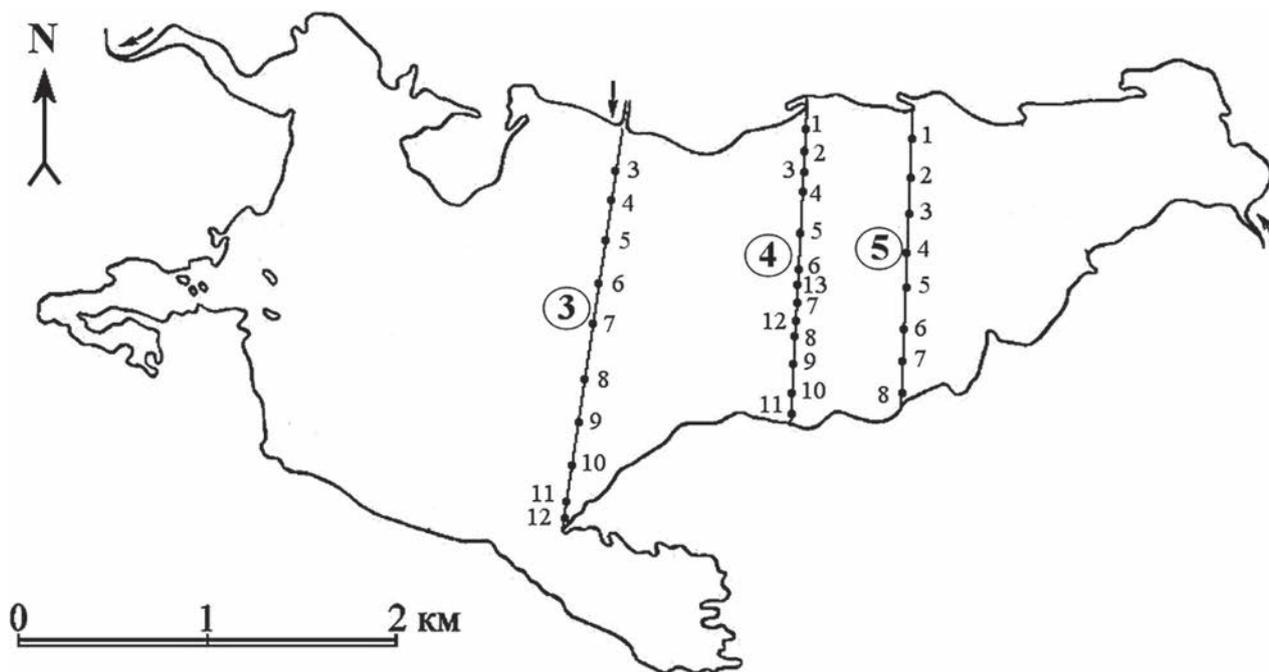


Рис. 1. Схема расположения станций наблюдений в оз. Вендюрском зимой 1994–1995 гг.
 Fig. 1. Location of the observational stations in Lake Vendyurskoe during winter 1994–1995

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

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

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

и среднеквадратичного отклонения (Root Mean Square Deviation, RMSD)

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

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

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

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

Результаты расчетов и их сравнение с данными наблюдений

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

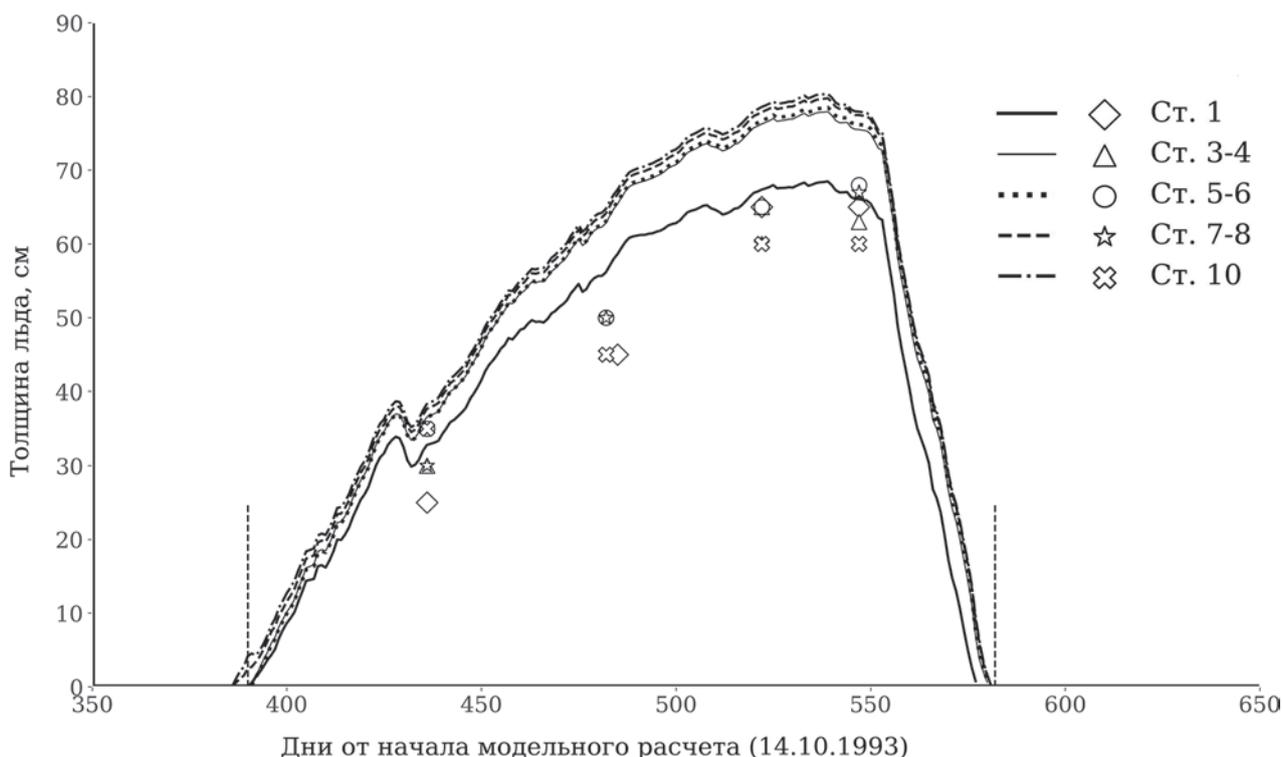


Рис. 2. Динамика ледяного покрова в ходе зимы 1994–1995 гг. в различных точках вдоль 4-го разреза по результатам модельных расчетов и оценок фактической толщины. Номер дня – от начала расчетов (14 октября 1993 г.). Линии – модельные данные, соответствующие станциям 4-го разреза, маркеры – натурные измерения.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

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

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

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

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

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

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

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

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

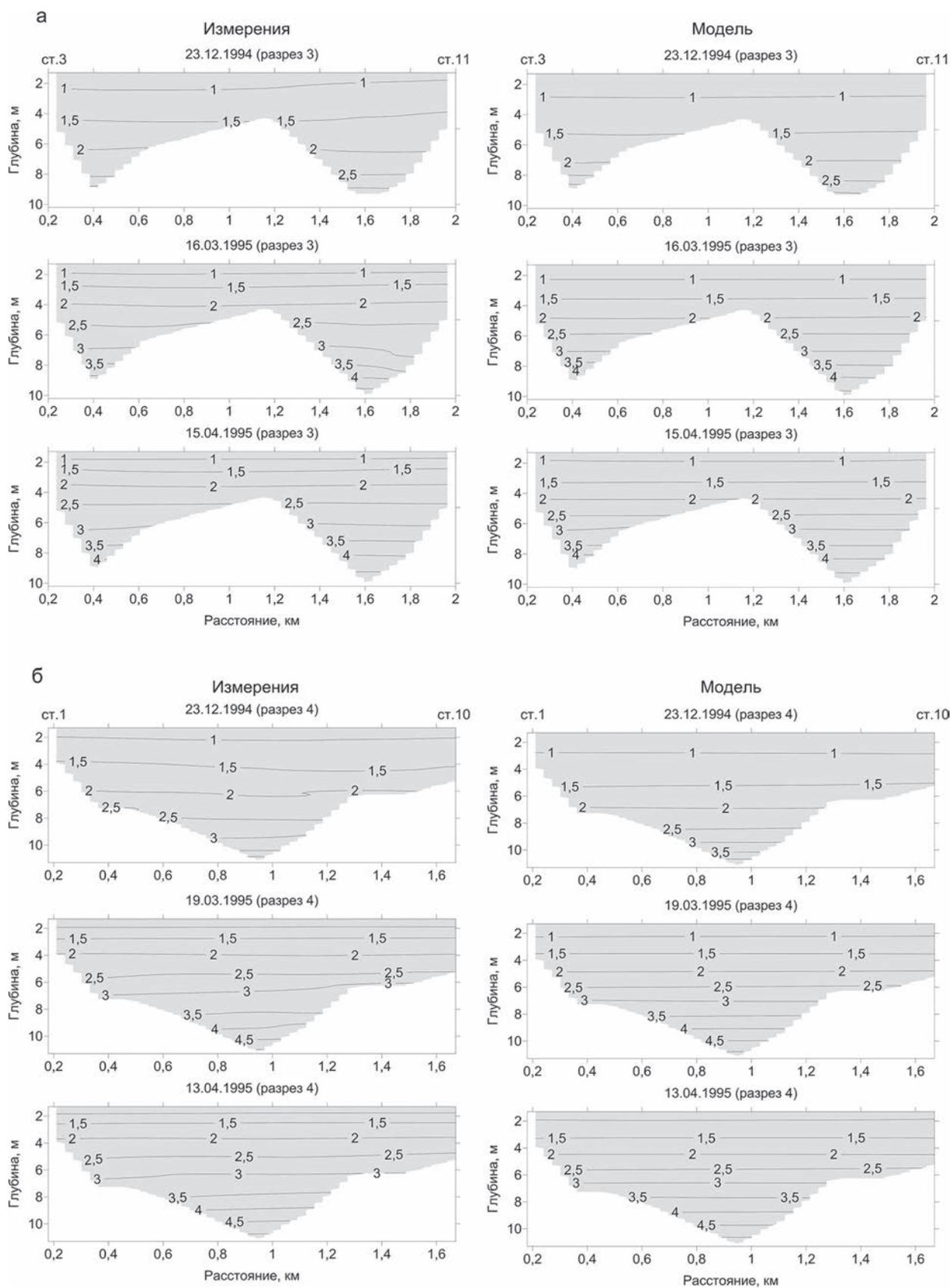


Рис. 3. Распределение измеренной и модельной температуры воды вдоль 3-го и 4-го разрезов зимой 1994–1995 гг.

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

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

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

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

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

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

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

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

Обсуждение результатов

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

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

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

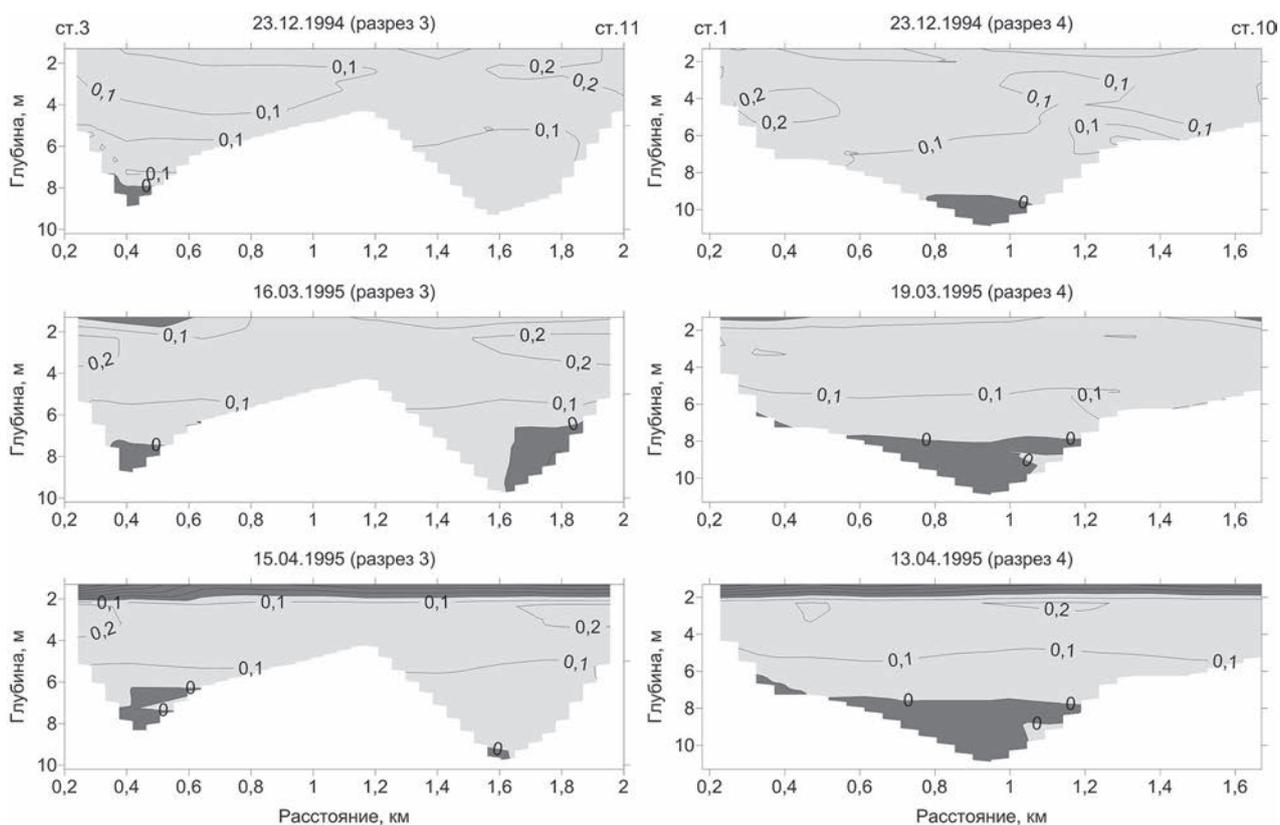


Рис. 4. Распределение относительной невязки модельной температуры воды вдоль разрезов 3, 4 и 5 по отношению к измеренным в ходе съемок 1994–1995 гг. значениям

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

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

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

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

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

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

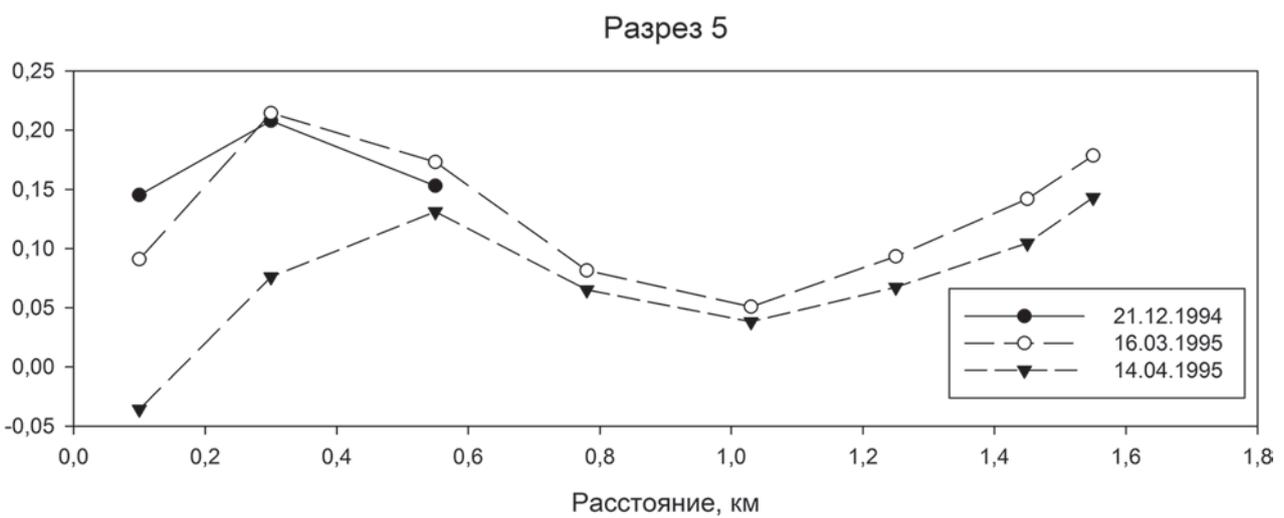
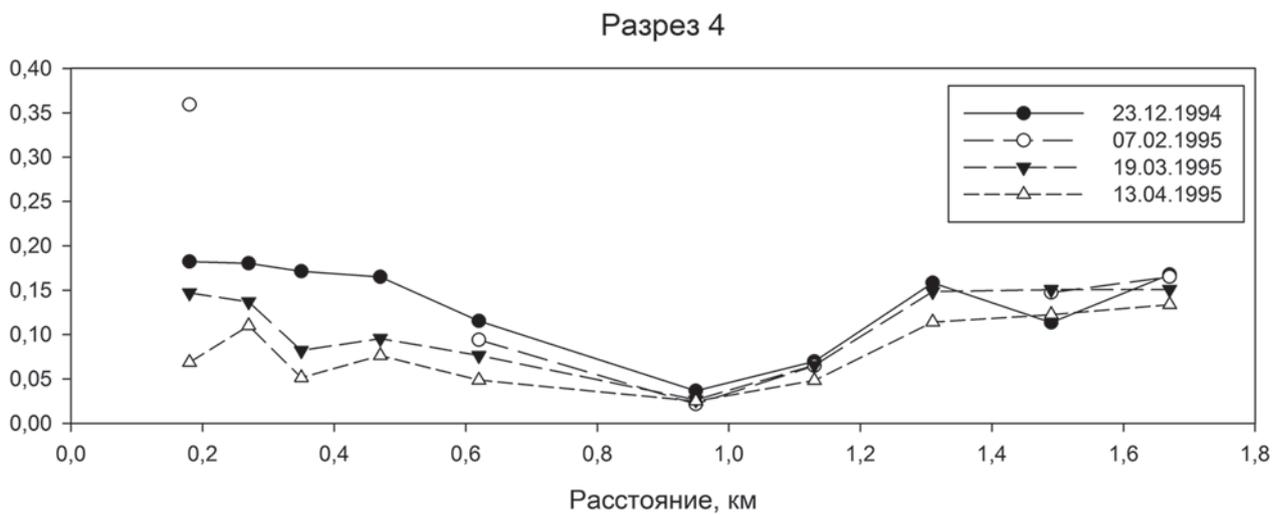
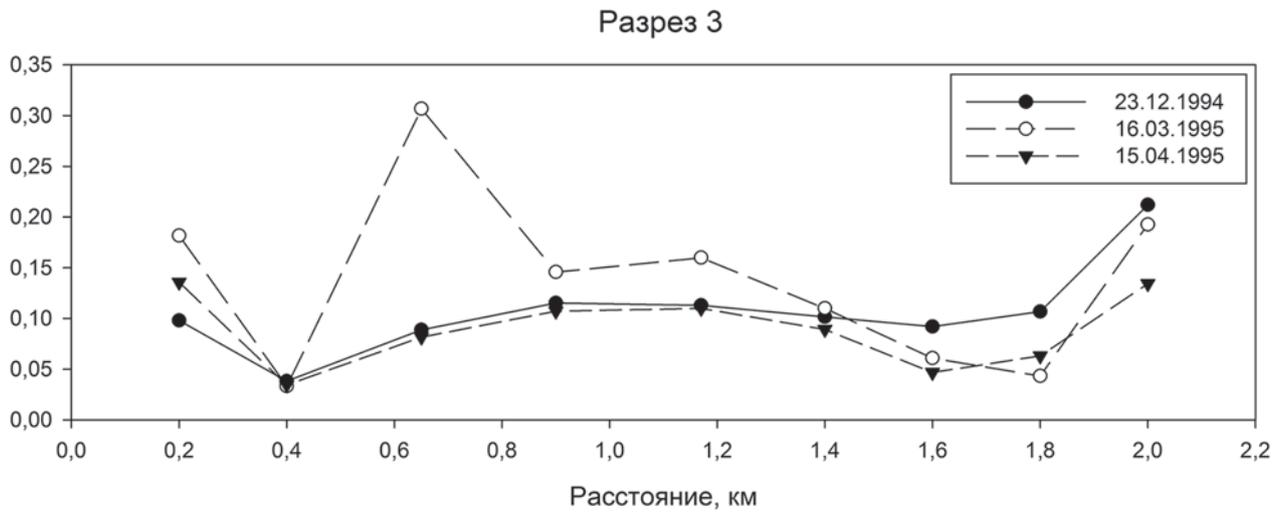


Рис. 5. Распределение относительной ошибки модельного значения средней по столбу температуры воды по разрезам (зима 1994–1995 гг.). Вертикальная ось – значения относительной ошибки, доли единицы
 Fig. 5. Relative residuals of modelled mean water column temperature along cross-sections (winter 1994–1995).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

Заключение

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

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

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

Литература

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Поступила в редакцию 08.07.2019

References

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

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

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

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

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

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

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

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

Zdorovenнова G. E., Gavrilenko G. G., Zdorovennov R. E., Mammarella I., Ojala A., Heiskanen J., Terzhevik A. Yu. Evolyutsiya temperatury vodnoi tolshchi boreal'nykh ozer na fone izmenenii regional'nogo klimata [Evolution of the temperature of the water column of boreal lakes against the background of changes in the regional climate]. *Izvestiya RGO* [The Russ. Geographical Society Herald]. 2017. Vol. 149, no. 6. P. 59–74.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Received July 08, 2019

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Зверев Илья Сергеевич

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

Здоровеннов Роман Эдуардович

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

Здоровеннова Галина Эдуардовна

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

Богданов Сергей Рэмович

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

Волков Сергей Юрьевич

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

Гавриленко Галина Геннадиевна

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

CONTRIBUTORS:

Zverev, Ilya

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

Zdorovennov, Roman

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

Zdorovennova, Galina

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

Bogdanov, Sergey

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

Volkov, Sergey

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

Gavrilenko, Galina

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

Ефремова Татьяна Владимировна

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

Пальшин Николай Иннокентьевич

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

Голосов Сергей Дмитриевич

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

Терзевик Аркадий Юрьевич

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

Efremova, Tatyana

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

Palshin, Nikolai

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

Golosov, Sergey

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

Terzhevik, Arkady

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