

ГИДРОФИЗИКА. ГИДРОЛОГИЯ

УДК 556.551:551.55

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

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

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

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

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

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

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

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

Введение

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

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

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

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

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

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

Материалы и методы. Описание модели

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ра в период открытой воды второго года модельного расчета.

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

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

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

Результаты и обсуждение

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

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

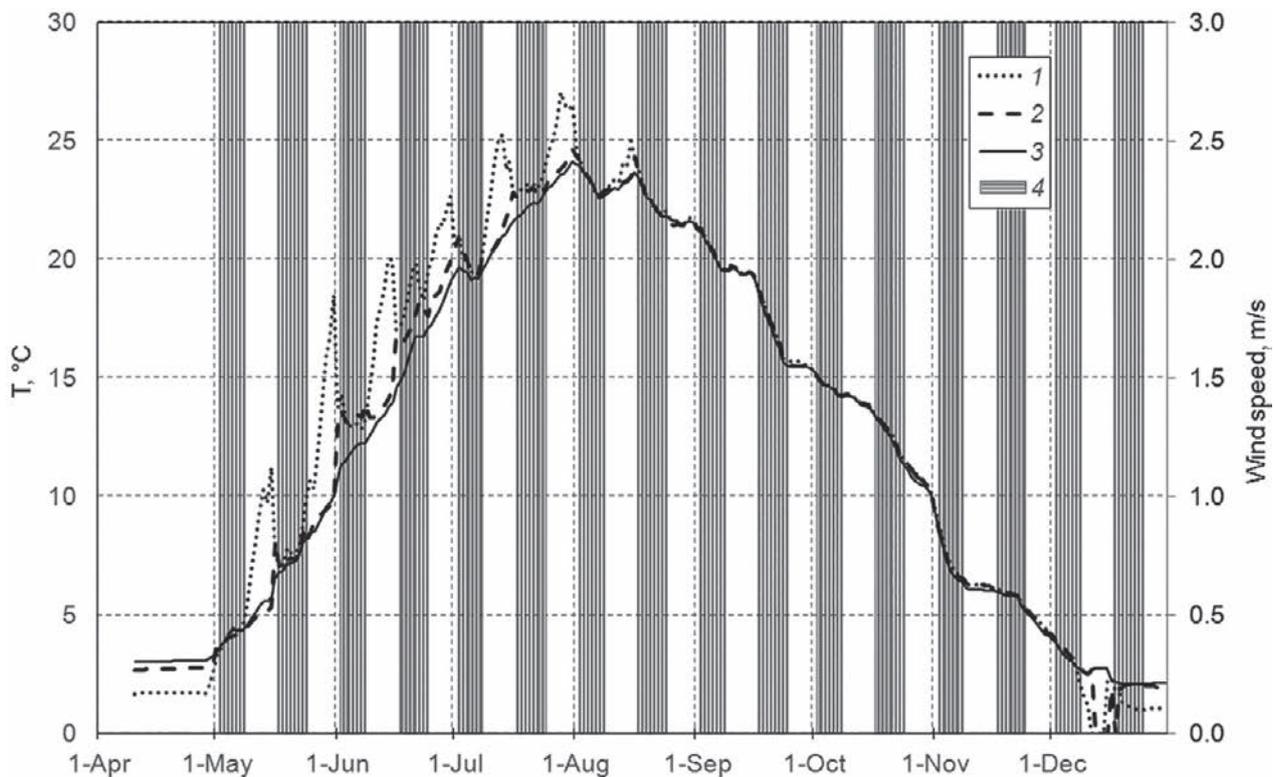


Рис. 1. Динамика температуры воды поверхностного слоя (1) и на глубинах 5 (2) и 11 (3) м в центральной глубоководной части озера Вендюрского в период с 1 апреля по 31 декабря 2005 г. Модельный расчет. 4 – периоды действия ветра

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

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

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

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

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

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

Анализ данных показал, что максимальные скорости течений на всех станциях

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

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

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

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

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

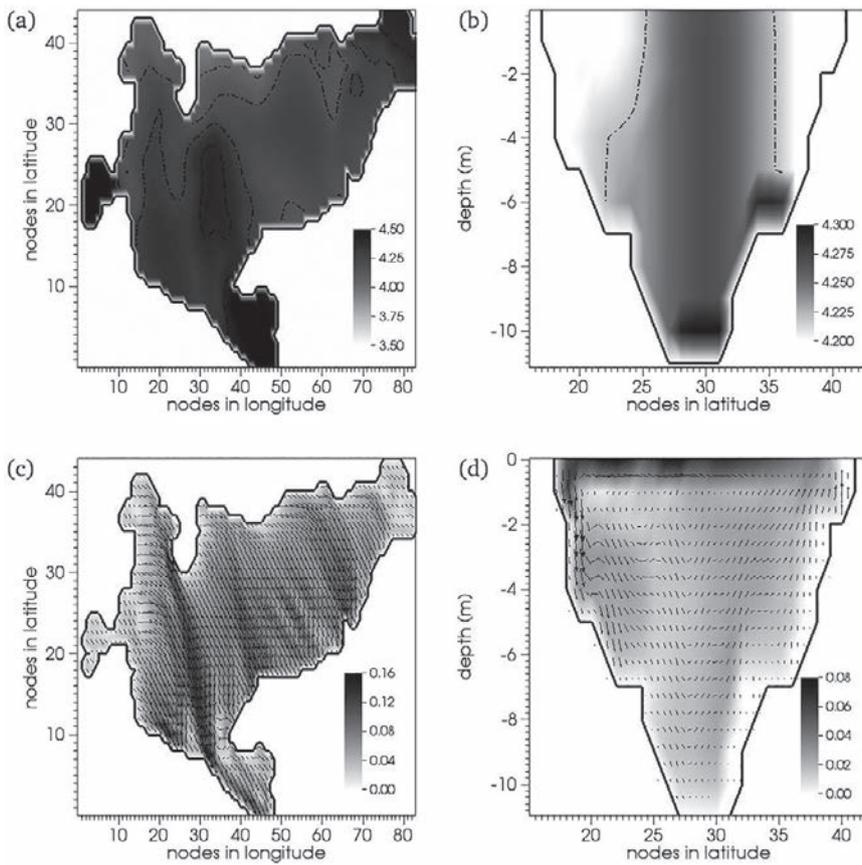


Рис. 2. Здесь и далее: поля температуры (а, б) и скоростей течений (с, д); скорости приведены в м/с, вертикальная скорость на панели (д) увеличена в 80 раз.

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

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

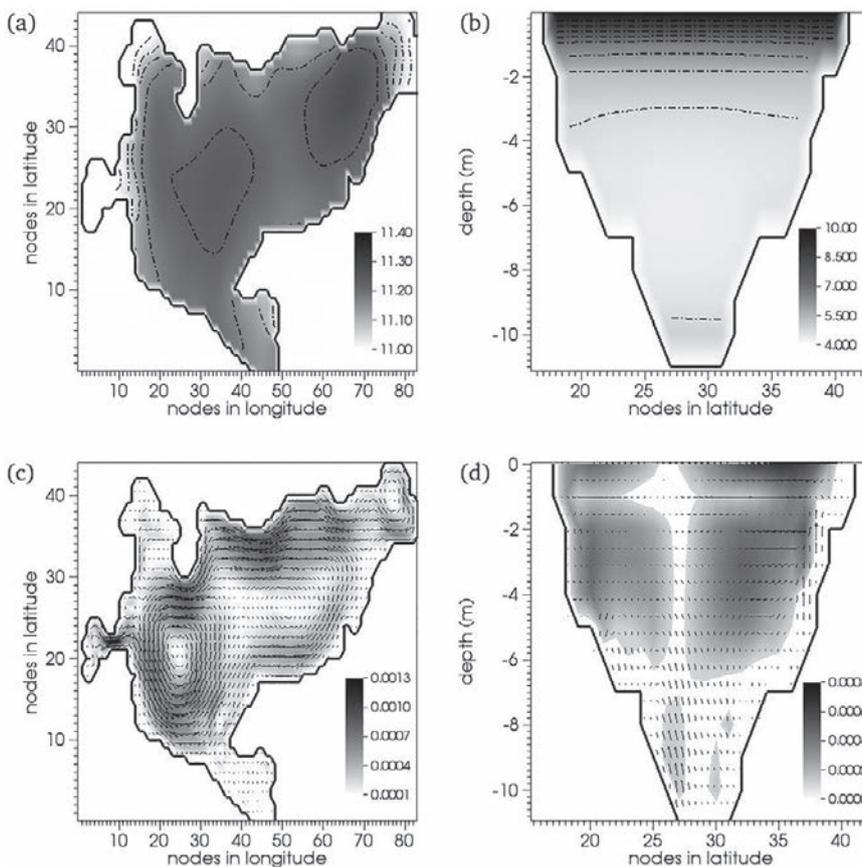


Рис. 3. 16 мая 2005 г. (7-е сутки штиля, стратифицирован верхний 3-м слой водной толщи, ниже – температура однородна)

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

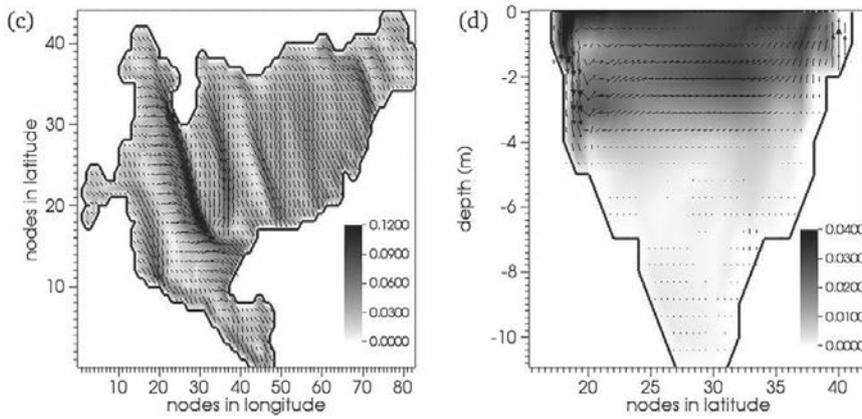
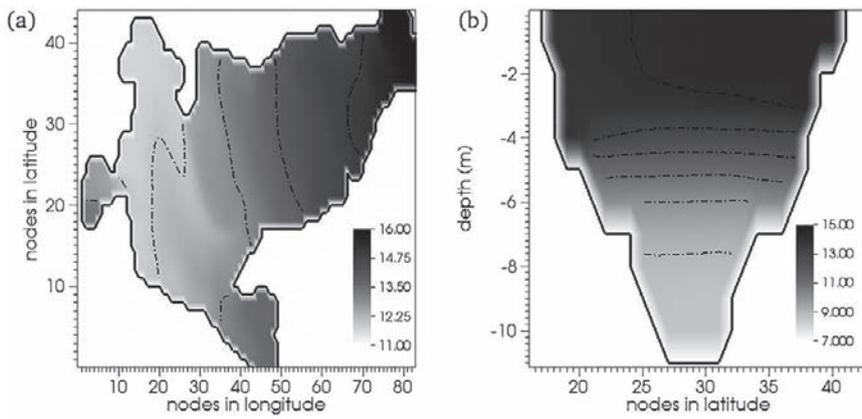


Рис. 4. 8 июня 2005 г. (7-е сутки действия западного ветра, толщина поверхностного перемешанного слоя 3,5 м)
 Fig. 4. June 8, 2005 (the 7th day of the west wind, surface mixed layer 3.5 m)

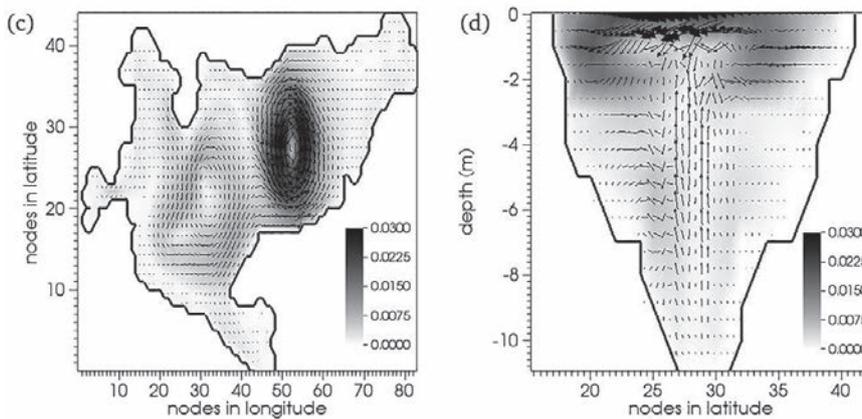
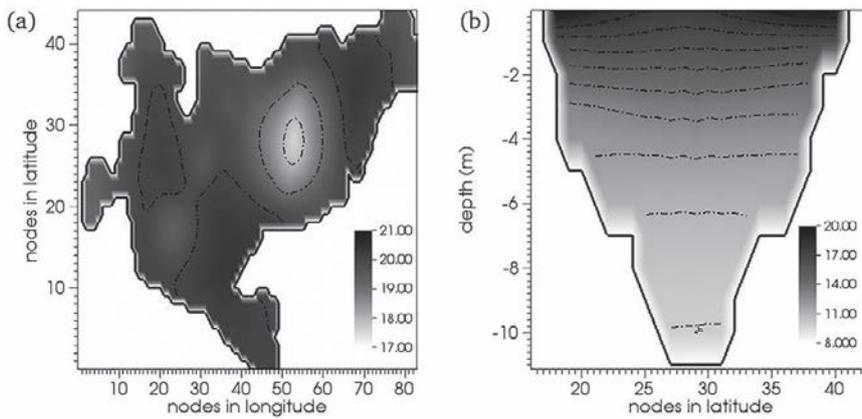


Рис. 5. 16 июня 2005 г. (7-е сутки штиля, водная толща стратифицирована)
 Fig. 5. June 16, 2005 (the 7th day of calm, the water column is stratified)

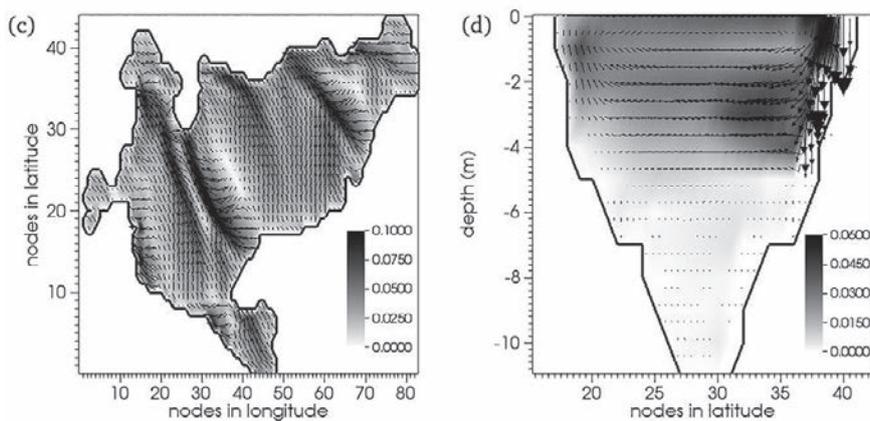
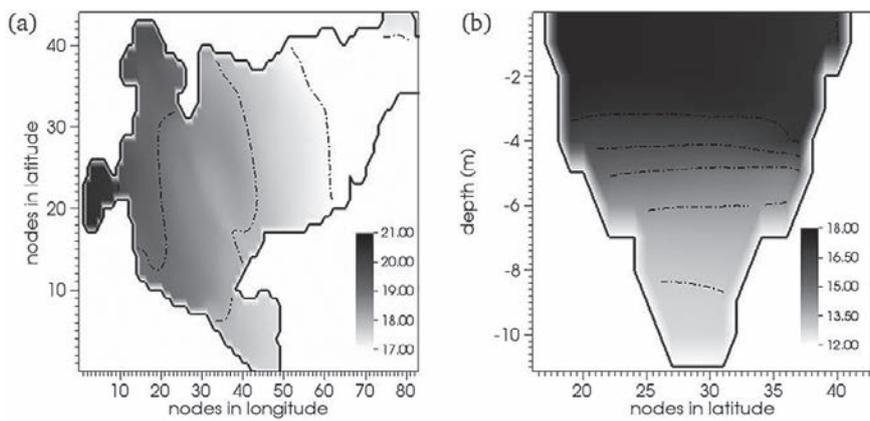


Рис. 6. 24 июня 2005 г. (7-е сутки действия восточного ветра, толщина поверхностного перемешанного слоя 3,5 м)
 Fig. 6. June 24, 2005 (the 7th day of the east wind, surface mixed layer 3.5 m)

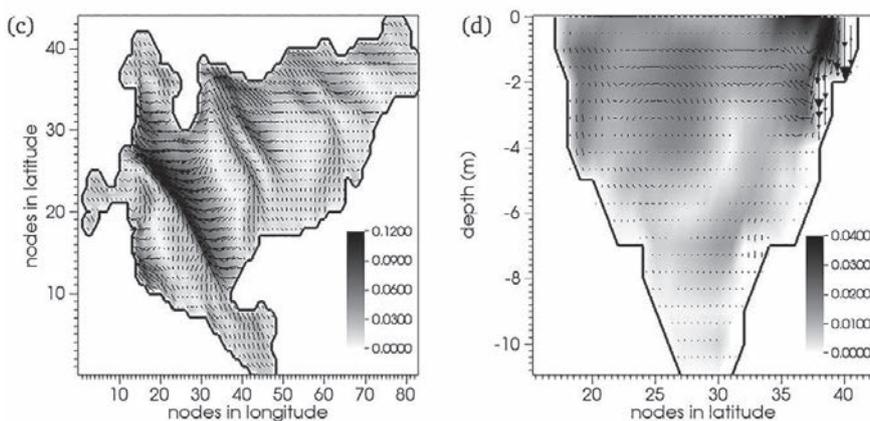
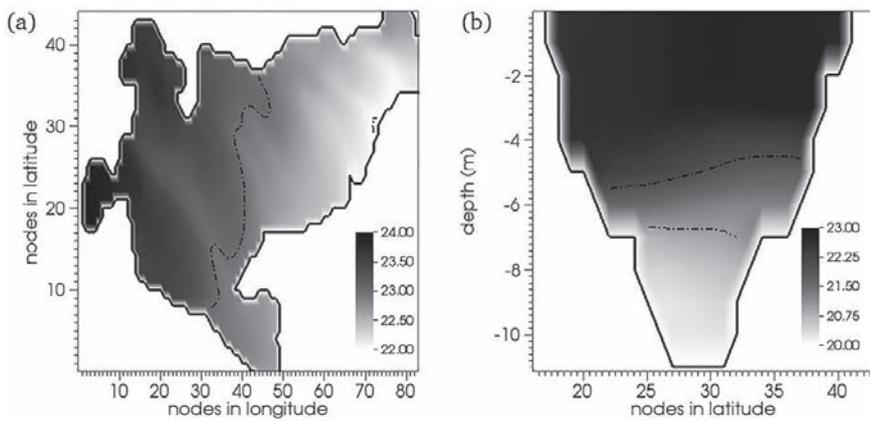


Рис. 7. 24 июля 2005 г. (7-е сутки восточного ветра, толщина поверхностного перемешанного слоя 3,5 м)
 Fig. 7. July 24, 2005 (the 7th day of the east wind, surface mixed layer 3.5 m)

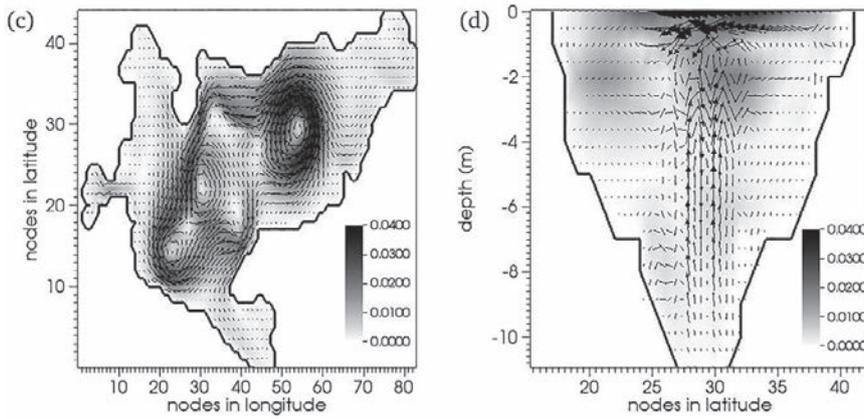
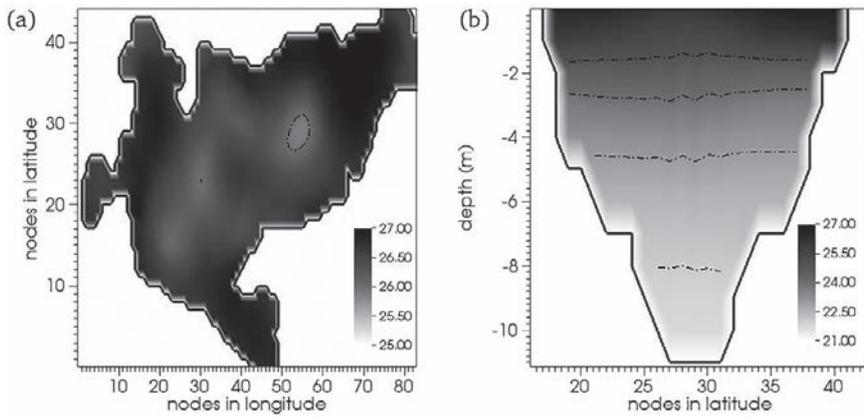


Рис. 8. 1 августа 2005 г. (7-е сутки штиля, водная толща стратифицирована)
 Fig. 8. August 1, 2005 (the 7th day of calm, the water column is stratified)

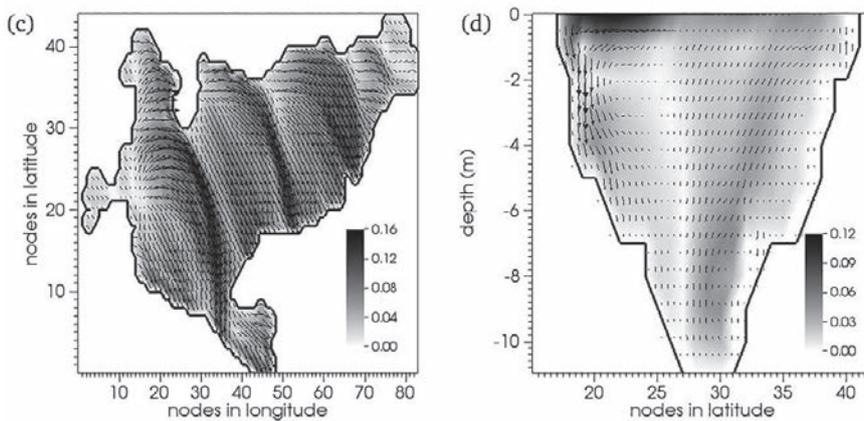
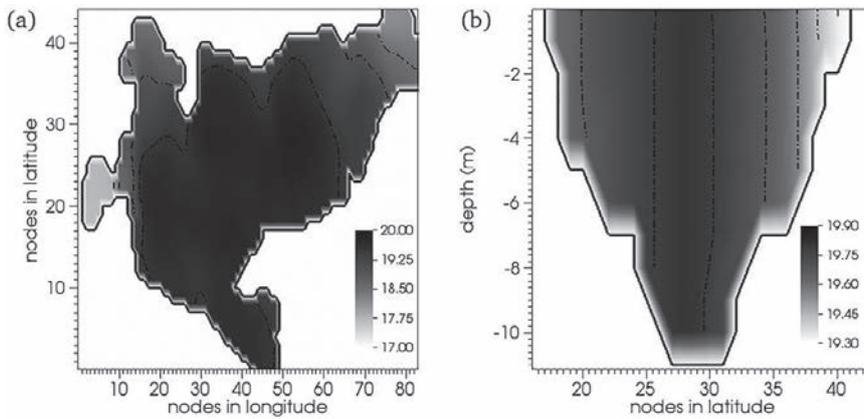


Рис. 9. 8 сентября 2005 г. (7-е сутки действия западного ветра, гомотермия)
 Fig. 9. September 8, 2005 (the 7th day of the west wind, homothermy)

Заключение

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

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

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

Литература

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

References

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Поступила в редакцию 13.08.2020

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Received August 13, 2020

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Зверев Илья Сергеевич

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

Здорovenнов Роман Эдуардович

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

Здорovenнова Галина Эдуардовна

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

CONTRIBUTORS:

Zverev, Ilya

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

Zdorovennov, Roman

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

Zdorovennova, Galina

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

Пальшин Николай Иннокентьевич

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

Богданов Сергей Рэмович

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

Гавриленко Галина Геннадиевна

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

Волков Сергей Юрьевич

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

Ефремова Татьяна Владимировна

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

Голосов Сергей Дмитриевич

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

Терзевик Аркадий Юрьевич

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

Palshin, Nikolai

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

Bogdanov, Sergey

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

Gavrilenko, Galina

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

Volkov, Sergey

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

Efremova, Tatyana

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

Golosov, Sergey

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

Terzhevik, Arkady

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