

## Вертикальное и горизонтальное распределение температур воды в период весеннего термобара в озере Долгое (Беларусь) по данным измерений и математического моделирования

Н. Ю. Суховило<sup>1</sup>✉, Б. О. Цыденов<sup>2</sup>, Д. Б. Власова<sup>1</sup>, И. С. Князев<sup>1</sup>, Н. С. Трунов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Республика Беларусь  
(220030, г. Минск, пр-т Независимости, 4)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Российская Федерация  
(634050, г. Томск, пр. Ленина, 36)

**Аннотация.** Цель – анализ вертикального и горизонтального распределения температуры воды в озере Долгое в период развития весеннего термобара 2024 г.

**Материалы и методы.** В конце марта 2024 г. в ходе полевых исследований научно-исследовательской лаборатории озероведения БГУ были установлены закономерности пространственного распределения температуры воды в озере Долгое. Результаты полевых исследований сравнивались с результатами математического моделирования.

**Результаты и обсуждение.** В результате установлено, что термобар в озере Долгое существовал с 26 по 31 марта 2024 г. Температура воды в этот период у берегов менялась от 4 до 8 °C, в открытой части водоема – от 0,8 до 4 °C. Моделирование физических процессов показало адекватное воспроизведение температур воды 30–31 марта 2024 г. в придонных слоях озера, в приповерхностных они были завышены относительно наблюдаемых на 0,5–1,4 °C, что связано с отсутствием данных наблюдений 24–29 марта и недочетом роли ветрового перемешивания в формировании термической структуры озера Долгое. Южнее плеса с максимальной глубиной расчетные температуры занижены в связи с движением фронта термобара со всех мелководий, а не только со стороны протоки из озера Свяцово.

**Выводы.** Из-за мелководности по сравнению с озерами Байкал, Ладожским и др., а также ориентации длинной оси озера по направлению преобладающих ветров, прямая температурная стратификация до разрушения термобара в озере Долгое сформировалась не успела по причине очень быстрого потепления на фоне активного ветрового перемешивания. Температуры воды в приповерхностных слоях оказываются завышены, в придонных почти не отличаются от измеренных.

**Ключевые слова:** озеро Долгое, температура воды, весенний термобар, математическое моделирование.

**Источник финансирования:** Исследование выполнено при финансовой поддержке БРФФИ, проект № Х23Р-НФМ-001 и РНФ, проект № 24-47-10001.

**Для цитирования:** Суховило Н. Ю., Цыденов Б. О., Власова Д. Б., Князев И. С., Трунов Н. С. Вертикальное и горизонтальное распределение температур воды в период весеннего термобара в озере Долгое (Беларусь) по данным измерений и математического моделирования // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 2025, № 3, с. 111-120. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/3/111-120>

### ВВЕДЕНИЕ

Тепловой режим водоемов является результатом взаимодействия зональных климатических и азональных геоморфологических факторов и служит фоном для протекания всех внутриводоемных процессов.

Впервые термобар был обнаружен Ф. Форлем. Изучая весенний температурный режим Женевского озера, он выявил, что прибрежные воды имеют устойчивую плотностную стратификацию, а в глубоководной части озера плотностной градиент выражен слабо. Между этими термическими структурами возникает фронтальная зона с наибольшими горизонтальными градиентами температуры, названная Ф. Фор-

лем термобаром [7]. Наиболее активное исследование эффекта термобара началось во 2 половине XX века под руководством А. И. Тихомирова [6].

Для изучения гидрофизики термобара в озерах средних широт используют 2D [3-4, 10, 12-13], 2.5D [14-15, 19] и 3D [20] модели (существующие работы посвящены воспроизведению весеннего термобара). Выбор модели зависит от цели исследования. Тем не менее, натурные наблюдения показывают, что при образовании и развитии термобара основные изменения происходят от берега (для озер проточного типа – от устья речного притока) к центру озера. При этом характеристики в направлении, параллельном берегу, до-



статочно однородны. На этом основании полагают [8], что модель, в которой исключены все градиенты в направлении, параллельном берегу, должна качественно и правильно описывать физический процесс развития термобара. Поэтому для исследования динамики термобара достаточно применять 2.5D модель, в которой используется такое приближение, переводящее задачу в двумерную, но учитывающую три компоненты вектора скорости, причем компонента скорости вдоль однородного направления в результате влияния силы Кориолиса может в некоторых областях доминировать над другими компонентами [14, 18].

В Беларуси работ, посвященных исследованию термобара, почти нет. У Л. В. Гурьяновой, которая на примере водоема охладителя тепловой электростанции (озеро Белое, Березовский район Брестской области) указывала что «В зимне-весенний период на границе центральной части озера, где сохраняется ядро холодных вод ( $2\text{--}3^{\circ}\text{C}$ ), и зоны с мономиктическим режимом (температура воды  $6\text{--}14^{\circ}\text{C}$ ) формируется термобар, который выполняет функцию плотностного барьера и ограничивает распространение подогретых вод по акватории водоема-охладителя» [2].

В материалах наблюдений за температурой воды, выполняемых Гидрометслужбой Республики Беларусь, в весенний и осенний периоды содержатся сведения о распределении температур воды в озере Нарочь, характерном для периода термобара [1].

Цель исследования заключалась в анализе вертикального и горизонтального распределения температуры воды в оз. Долгое в период развития весеннего термобара 2024 года.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Озеро Долгое – самое глубокое озеро Беларуси (максимальная глубина –  $53,7\text{ м}$ ). Средняя глубина превышает  $16\text{ м}$ . При относительно небольшой площади ( $2,6\text{ км}^2$ ) за счет значительных глубин объем воды в озере равен  $43,2\text{ млн. м}^3$ . Котловина озера ледникового происхождения, ложбинного типа, вытянута с северо-запада на юго-восток на  $6\text{ км}$ . Длинная ось озера совпадает с направлением преобладающих ветров. Это способствует достаточно активному перемешиванию водной массы в периоды формирования термобара. Географическое положение объекта исследования показано на рисунке 1.

Рассматривается продольный разрез оз. Долгое (рис. 2, слева), длина и глубина расчетной области (которая покрыта сеткой с шагами  $h_x = 12,5\text{ м}$  и  $h_z = 1,5\text{ м}$ ) составляют  $4,6\text{ км}$  и  $54\text{ м}$  соответственно (рис. 2, справа). Батиметрические данные взяты из работы [5]. Шаг по времени составил  $20\text{ с}$ .

Моделирование осуществлялось по методике [18] и охватывает период с 20.03.2024 по 31.03.2024. Начальная температура воды в оз. Долгое принята равной  $2,5^{\circ}\text{C}$ . Минерализация воды согласно данным измерений составляет  $269,83\text{ мг/дм}^3$ . На левой границе расчетной области скорость течения задана равной  $0,5\text{ см/с}$ , а значение температуры воды монотонно росло в диапазоне  $3,5\text{--}9,4^{\circ}\text{C}$ . На дне водоема  $H_{geo} = 0,05\text{ Вт/м}^2$ . Коэффициенты горизонтальной вязкости и диффузии  $K_x$  и  $D_x$  приняты равными  $2,5\text{ м}^2/\text{с}$ . В расчетах использованы метеорологические данные станции городского поселка Шарковщина за март 2024 г.<sup>1</sup>

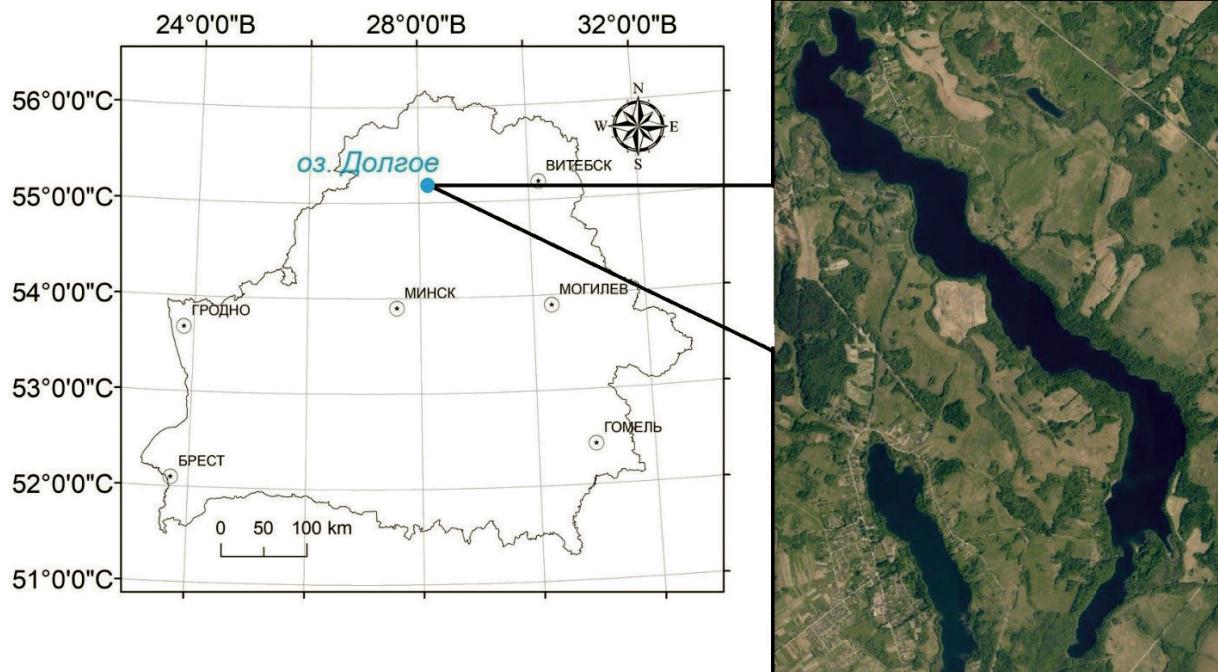


Рис. 1. Географическое положение оз. Долгое  
[Fig. 1. Location of Lake Dolgoe]

<sup>1</sup> Архив погоды в Шарковщине. – URL: [https://rp5.by/Архив\\_погоды\\_в\\_Шарковщине](https://rp5.by/Архив_погоды_в_Шарковщине) (дата обращения: 05.07.2024). – Текст: электронный.

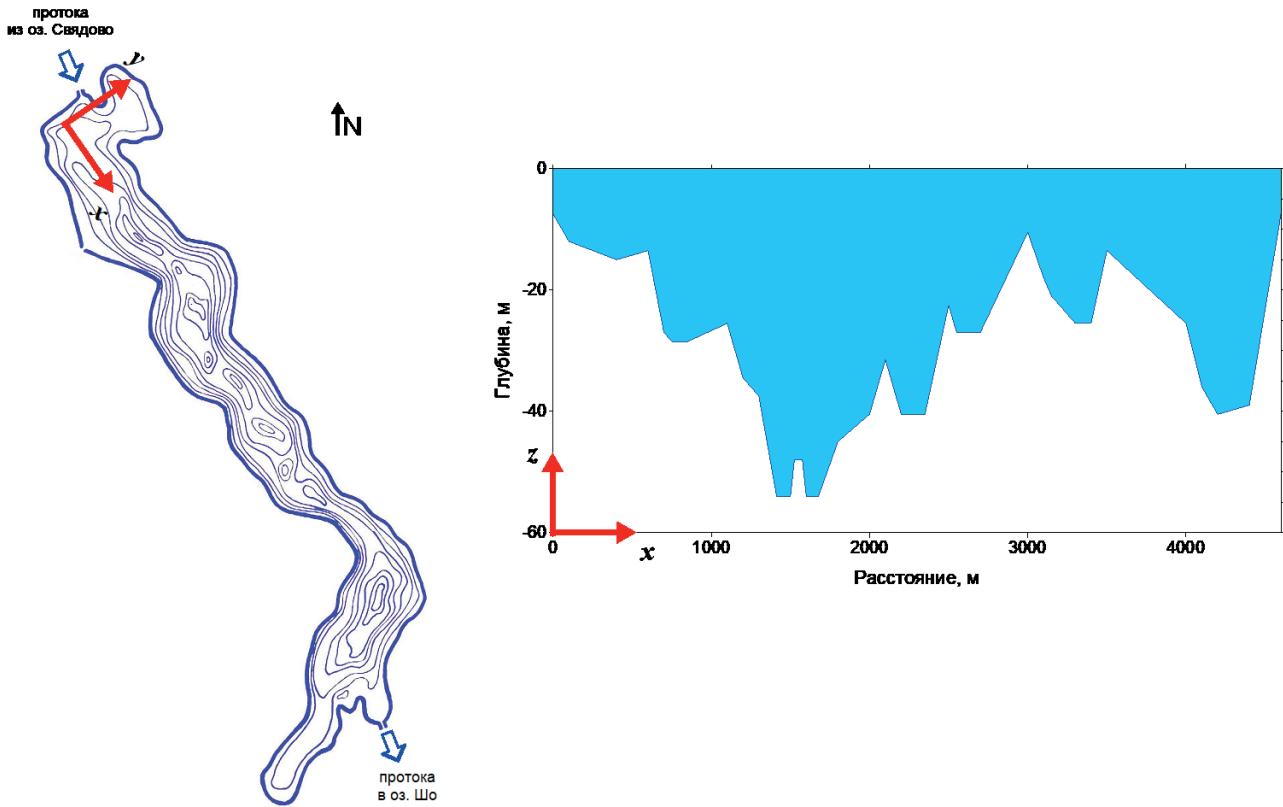


Рис. 2. Батиметрическая схема озера Долгое (слева) и расчетная область (справа)  
[Fig. 2. Bathymetric scheme (left) and calculation area (right)]

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По данным дистанционного зондирования Земли [17] и натурных наблюдений ледовый покров на озере полностью разрушился 24 марта 2024 г. Полевые исследования термобара выполнялись 30-31 марта 2024 г. Из-за резкого потепления в конце марта 2024 г. период существования термобара в озере Долгое составил 4-5 суток. Результаты предварительного моделирования [16] оказались завышены, однако в 2024 г. весенне нагревание озера шло активнее, чем в среднем за многолетний период.

По данным дистанционного зондирования Земли начало развития термобара отмечалось не ранее 26 марта 2024 г., что подтверждается данными дистанционного зондирования Земли (см. рис. 2). Движение его фронта начинается от мелководных участков на севере (в устье протоки из оз. Свяцово) и юге. Распределение температур воды и суши 26 марта 2024 г. по данным космического аппарата Landsat 8 отражено на рисунке 2. Из рисунка видно, что северный и южный заливы озера прогреты лучше, чем глубоководная зона. Максимальная температура воды была отмечена у берега и составила около 5,5 °C. Области с более высокими температурами соответствуют полосе распространения сухого тростника, поэтому не являются репрезентативными.

30 марта 2024 г. вертикальное распределение температуры воды от устья протоки в оз. Свяцово до места

обнаружения термобара в плесе с максимальной глубиной выглядело так, как представлено на рисунке 3.

30 марта в 12:00 температура воды в прибрежной зоне составляла 6-6,3 °C. При движении по профилю, направленному от протоки из оз. Свяцово по длинной оси водоема, температура она понижалась и в плесе с максимальной глубиной составила 3,8 °C.

Как видно из рисунка 4, на глубинах 5-12 м начинала формироваться прямая температурная стратификация, на литорали и в пелагии наблюдалось состояние, близкое к гомотермии.

Распределение температур воды в поверхностном слое на эту же дату представлено на рисунке 5. Более активное прогревание происходило в узкой прибрежной зоне, а также в относительно мелководном заливе на севере водоема. Термобар был обнаружен только в плесе с максимальной глубиной. Южнее него температуры воды были ниже 4 °C. Вода у высокого западного берега, находившаяся в его тени, также отличалась пониженными температурами. Литораль там практически отсутствует, поэтому прогрев происходит медленнее. Измерения в южной части озера не выполнялись, но строение котловины озера позволяет сделать вывод о том, что выявленные закономерности распределения температур воды там носят аналогичный характер и в целом зависят от морфометрии водоема.

Температура воздуха в марте 2024 г. в среднем растет. Она колеблется в пределах от минус 6 °C до 9 °C в

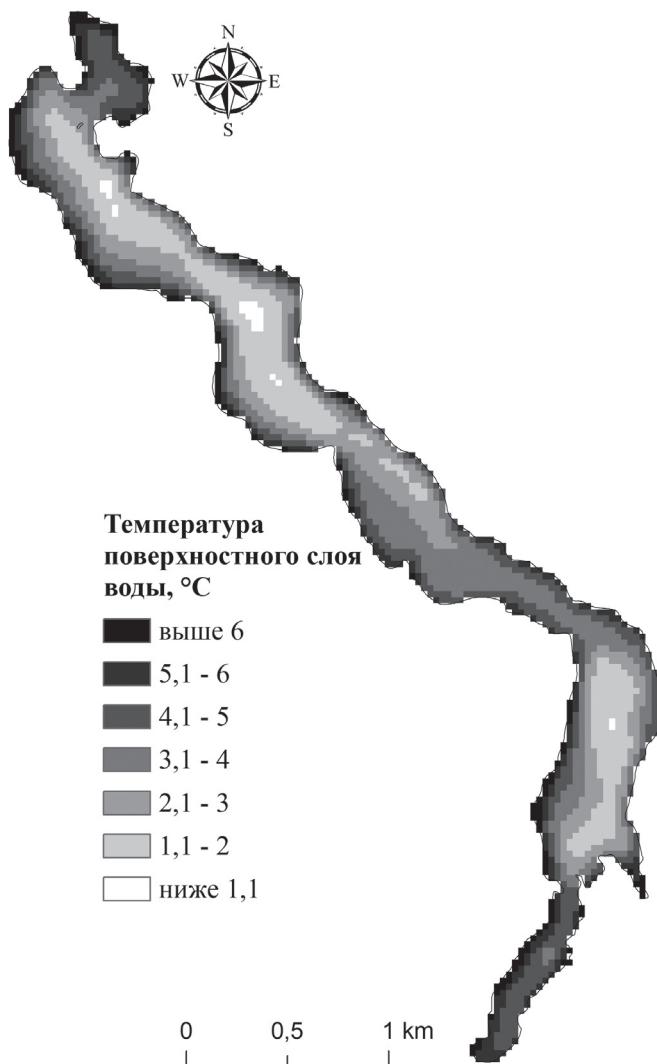


Рис. 3. Распределение температур воды в поверхностном слое озера Долгое 26 марта 2024 г.  
по данным космического аппарата Landsat 8 [17]

[Fig. 3. Distribution of surface water temperature in Lake Dolgoe 26.03.2024 according to Landsat 8 [17]]

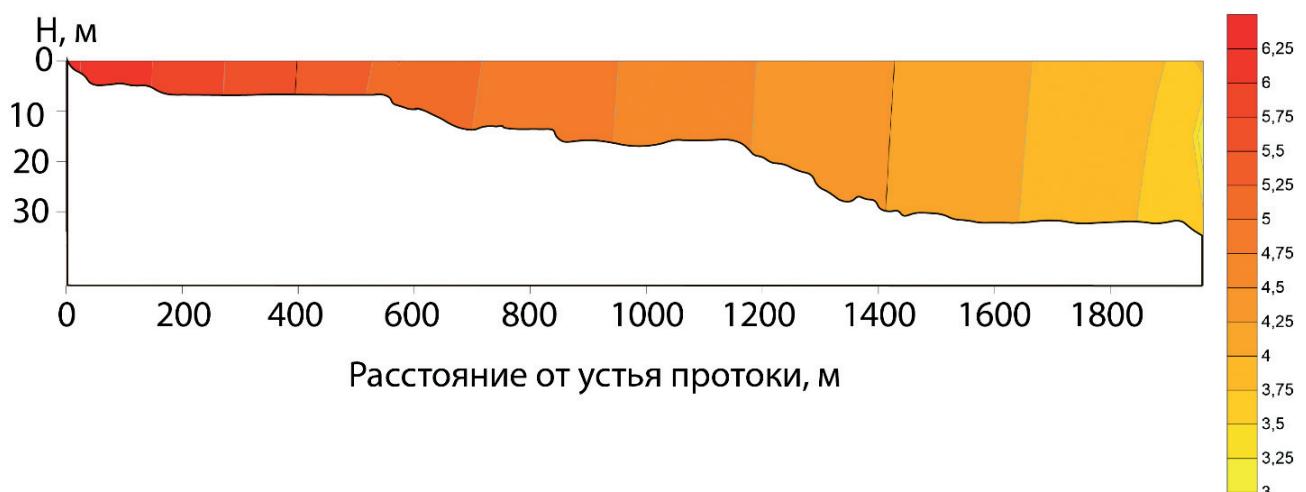
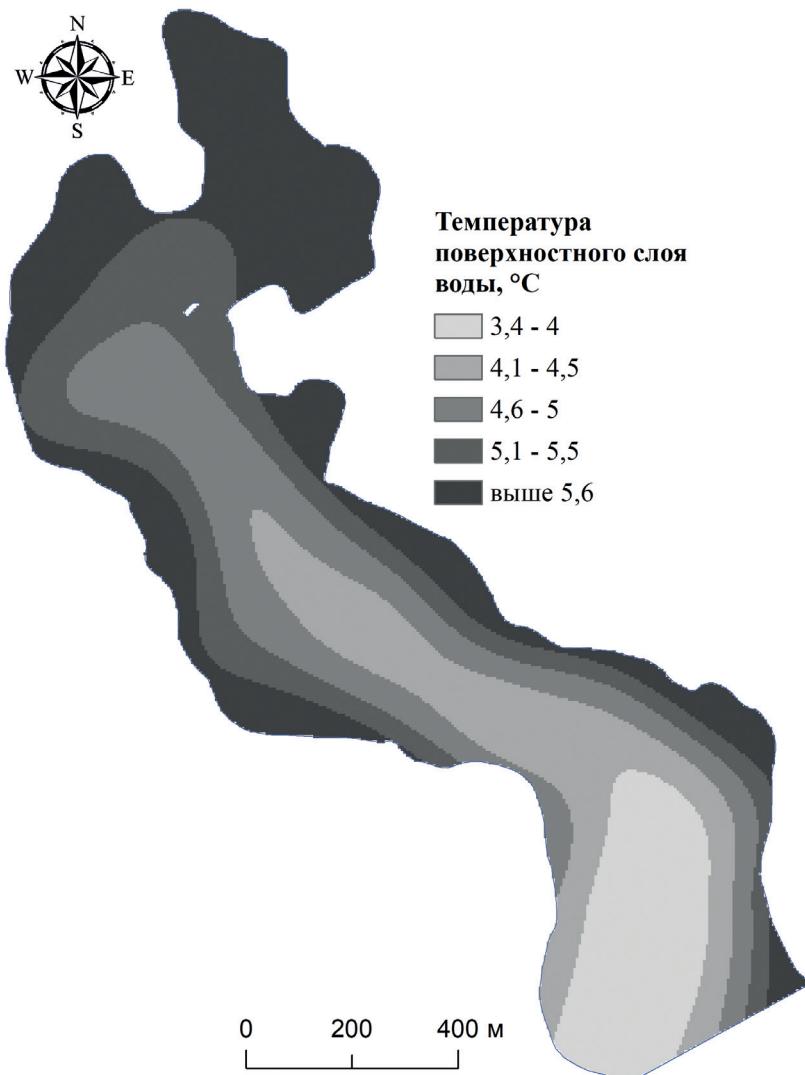


Рис. 4. Вертикальное распределение температуры воды в северной части оз. Долгое 30.03.2024  
[Fig. 4. Vertical distribution of water temperature in the northern part of Lake Dolgoe 30.03.2024]



*Рис. 5. Распределение температур воды в поверхностном слое северной части озера Долгое 30.03.2024 по результатам термической съемки*

[Fig. 5. Distribution of water temperatures in the surface layer of the northern part of Lake Dolgoe on 30.03.2024 based on the results of thermal survey]

первой декаде марта, от минус 5 °С до 12 °С – во второй, и от минус 2 °С до 22 °С - в третьей, что иллюстрирует рисунок 6. Самая низкая температура от минус 2 °С до 2 °С в третьей декаде достигается в промежутках 20-22 и 24-26 марта. Пики температуры приходятся на 30 и 31 марта – 18 °С и 22 °С соответственно. Максимумы температуры в другие дни третьей декады значительно ниже – до 12 °С. Относительная влажность сильно колеблется в течение марта 2024 г. В третьей декаде относительная влажность варьируется в пределах от 36 % до 100 %. Максимумы влажности 27 и 28 марта заметно ниже остальных – они не превышают 80 %, хотя в остальные дни влажность достигает 90 % и выше. Локальные минимумы варьируются шире максимумов. Точки локальных максимумов относительной влажности почти на протяжении всего марта совпадают с точками локальных минимумов температуры воздуха, и также точки минимумов – с точками максимумов.

Облачность в первой декаде марта преимущественно нулевая, во второй декаде – преимущественно в 9 и 10 баллов, и в третьей – преимущественно в 10 баллов. В третьей декаде можно отметить участок постоянной облачности в 10 баллов на 22-24 марта, а на 27-31 марта облачность многократно достигала 10 баллов, но сильно варьировалась. Атмосферное давление в среднем падает в течение марта 2024 г. В первой декаде оно меняется в амплитуде 1003-1014 гПа, во второй – 993-1012 гПа, и в третьей – 979-1008 гПа. В третьей декаде можно выделить участки относительной монотонности атмосферного давления: участки убывания на 21-24 марта (с 1008 до 980 гПа), 27-28 марта (с 996 до 979 гПа) и 31 марта (с 995 до 988 гПа), а также участки возрастания на 24-26 марта (с 980 до 996 гПа) и 29 марта (с 979 до 993 гПа).

Ветер в течение марта довольно постепенно меняет направление, что отражено на рисунке 7. В первой

декаде можно выделить преобладание юго-восточного, восточного и западо-северо-западного ветров со скоростью 0-4 м/с. Во второй декаде наблюдался ветер, постепенно меняющий направление с восточного на южный, а также западо-северо-западный, северный и восточно-северо-восточный ветры со скоростью 0-5 м/с. В третьей же декаде можно отметить ветер, меняющийся с южного на западный на 20-23 марта,

а также ветер, колеблющийся по направлению с южного до восточно-юго-восточного на 25-28 марта, со скоростью 0-6 м/с. Самыми сильными были порывы южного ветра 27 и 28 марта со скоростью 6 м/с, восточно-юго-восточного ветра 28 марта со скоростью 5 м/с и западного ветра 29 марта со скоростью 5 м/с. На 25-27 марта дул преимущественно южный ветер со скоростью до 2 м/с.

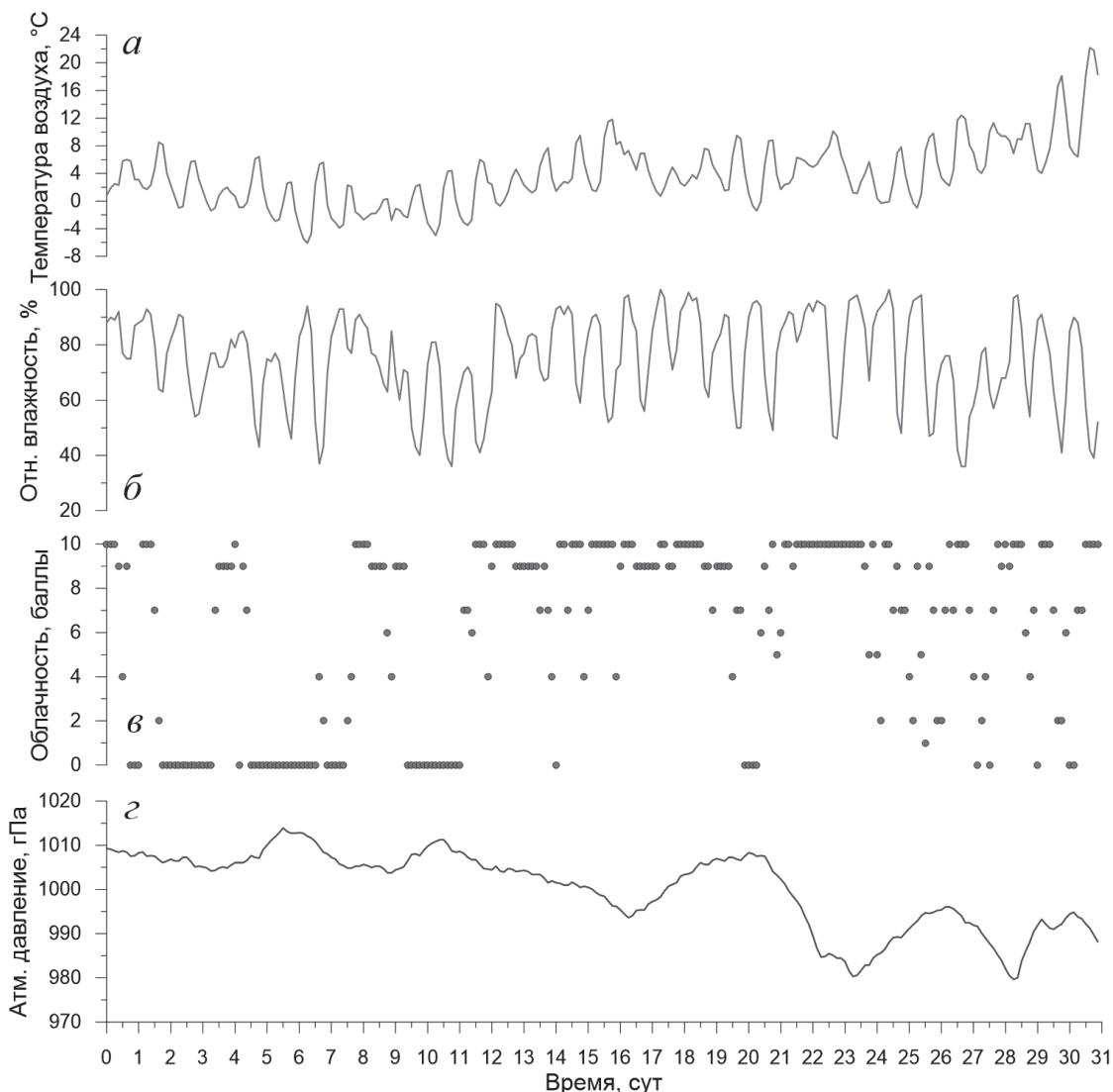


Рис. 6. Температура воздуха, относительная влажность (б), облачность (в) и атмосферное давление (г) в марте 2024 г.  
[Fig. 6. Air temperature (a), relative humidity (b), cloudiness (c) and atmospheric pressure (d) in March, 2024]

Из данных о тепловых потоках, отраженных на рисунке 8, видно, что прогревание озера идет преимущественно за счет потоков коротковолновой радиации и явного тепла. Из-за переменчивой облачности в третьей декаде марта пики коротковолновой радиации значительно различаются: их значения колеблются от 220 до 520 Вт/м<sup>2</sup>. Участкам высокой облачности соответствуют меньшие значения коротковолновой радиации. Потоки явного тепла варьируются в пределах от минус 20 до 95 Вт/м<sup>2</sup>. Длинноволновая радиация и скрытое тепло охлаждают озеро. Потоки скрытого теп-

ла принимают исключительно отрицательные значения от минус 125 до 0 Вт/м<sup>2</sup>. Потоки длинноволновой радиации принимают преимущественно отрицательные значения от минус 110 до 10 Вт/м<sup>2</sup>, но достигают пика 80 Вт/м<sup>2</sup> 31 марта.

По распределению температуры видно, что исследуемая область на 28-30 марта постепенно прогревается, все изотермы удаляются от устья. Профиль температуры максимальной плотности при этом также постепенно удаляется от устья (на поверхности он продвигается от 720 до 1290 м от устья, а на дне – от 620 до

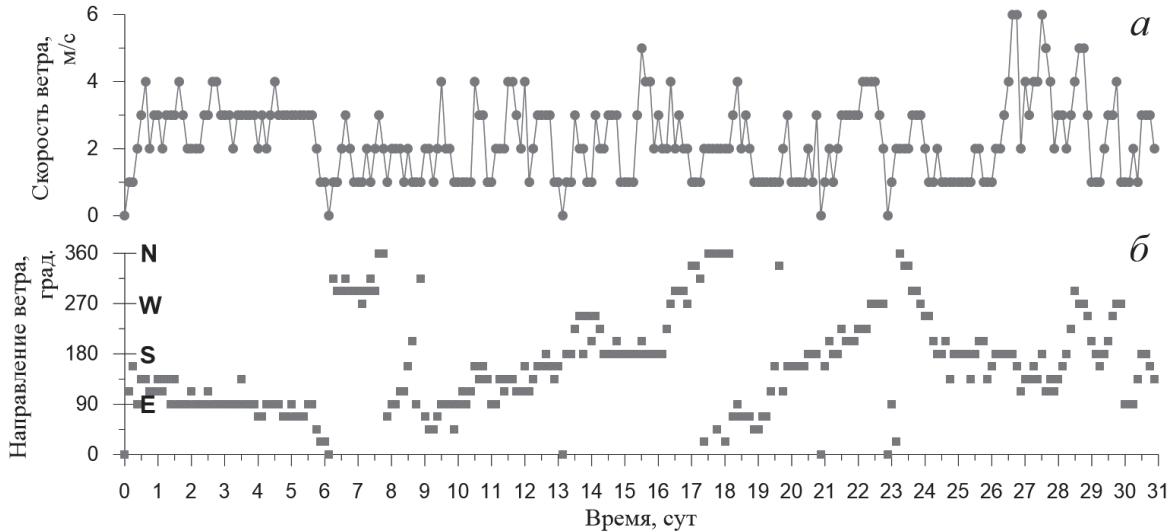


Рис. 7. Скорость (а) и направление (б) ветра в марте 2024 г.  
[Fig. 7. Wind speed (a) and direction (b) in March, 2024]

1120 м от устья). 31 марта ситуация меняется и прогревание озера становится неравномерным: поверхность по-прежнему прогревается, но дно в теплоактивной области (до 1120 м от устья), наоборот, охлаждается. Изотермы 31 марта в теплоактивной области, соответственно, принимают более горизонтальный характер.

То же происходит и с профилем температуры максимальной плотности: на поверхности он удаляется на 1800 м от устья, однако у дна он приближается к устью и становится удален от него на 1080 м. В открытом озере же вблизи профиля продолжается постепенное прогревание по всей глубине.

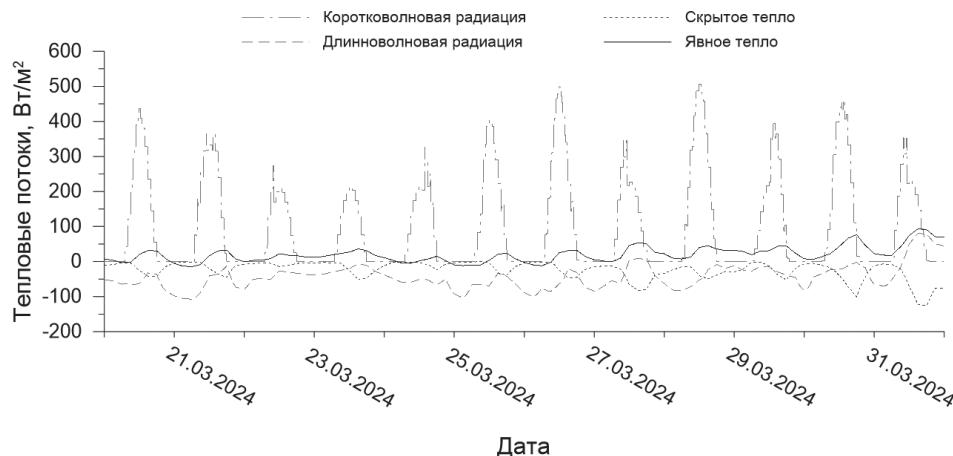


Рис. 8. Тепловые потоки в третьей декаде марта 2024 г.  
[Fig. 8. Heat flows in March, 2024]

По векторному полю скорости в 0:00 30 марта видно два вихря. Ближе к устью расположен маленький вихрь (его центр локализован на расстоянии 300 м от устья и на глубине 6 м), дальше по профилю находился более крупный вихрь (его центр локализован на удалении 900 м от устья на глубине 11 м). Оба они находились в теплоактивной области. Векторное поле скорости в 0:00 31 марта меняется: вихри разрушились, и в связи с этим значительно упала скорость придонного течения. Максимальная скорость течения в обоих случаях достигается на поверхности и составляет 0,017 м/с. В обоих случаях наблюдались два локальных максимума скорости течения. 30 марта оба максимума были расположены

на поверхности над центрами вихрей: 0,017 м/с на 300 м от устья и 0,015 м/с на 900 м от устья. 31 марта первый максимум был аналогичен и расположен на том же удалении 300 м от устья. Второй максимум составлял 0,013 м/с и был удален от устья на 1500 м.

Полученные в ходе математического моделирования изотермы имеют качественное расхождение с результатами полевых исследований, что связано, прежде всего, с заданием в расчетах однородного распределения температуры в начальный момент времени в связи с отсутствием данных измерений перед началом развития термобара. Кроме того, в условиях мелководья большое значение в характере изотерм имеют параметры

тры атмосферы (особенно ветер), воздействующие на водное зеркало [18]. Важно заметить, что взятые в качестве граничного условия на поверхности водоема метеорологические данные станции г. п. Шарковщина, расположенной в 44 км от оз. Долгое, не совсем точно отражают атмосферные процессы, происходящие над озером. Для моделирования гидродинамики небольших водоемов выбор релевантных начальных и граничных условий играет ключевую роль в получении адекватных результатов.

Следует отметить, что период развития весеннего термобара в оз. Долгое в 2024 г. наблюдалось аномальное повышение температуры воздуха, ускорившее термические процессы в водоеме. Резкое потепление в конце марта 2024 г. на фоне активного ветрового перемешивания привело к быстрому прогреву водной массы озера без формирования на мелководьях до глубины 12 м прямой стратификации. Обратная стратификация в теплоинертной зоне до 30 марта разрушилась, и в плесе с максимальной глубиной наблюдалось состояние, близкое к гомотермии.

Моделирование физических процессов показало адекватное воспроизведение температур воды 30-31 марта 2024 г. в придонных слоях озера, в приповерхностных они были завышены относительно наблюдаемых на 0,5-1,4 °C, что связано с отсутствием данных наблюдений 24-29 марта и недоучетом роли ветрового перемешивания в формировании термической структуры озера Долгое. В результате гомотермия отмечается в теплоактивной и теплоинертной зонах. В теплоактивной зоне температуры воды на всех горизонтах превышают 4 °C, достигая у берегов 6,3-8,0 °C, в теплоинертной составляют около 3,6-3,9 °C. Южнее плеса с максимальной глубиной расчетные температуры занижены в связи с движением фронта термобара со всех мелководий, а не только со стороны протоки из оз. Свяцово.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

На основании проведенных исследований было выявлено, что весенний термобар в оз. Долгое в 2024 г. имел свои специфические черты: небольшую продолжительность существования, отсутствие прямой термической стратификации в мелководной теплоактивной зоне, несущественное влияние на распределение минерализации воды, ее компонентов и других растворенных веществ.

По данным дистанционного зондирования Земли начало развития термобара отмечалось не ранее 26 марта 2024 г. Движение его фронта начинается от мелководных участков на севере (в устье протоки из оз. Свяцово) и юге, а также от всех берегов, освещенных солнцем в дневное время. 30 марта в 12:00 температура воды в прибрежной зоне составляла 6-6,3 °C. При движении по профилю, направленному от протоки из оз. Свяцово по длинной оси водоема, температура она понижалась и в плесе с максимальной глубиной составила 3,8 °C, что очень близко к температуре максимальной плотности. 31 марта к 17:00 температура всей

водной поверхности достигла 4 °C, и термобар прекратил свое существование.

Результаты математического моделирования в настоящее время расходятся с измеренными 30-31 матра температурами воды в приповерхностном слое озера Долгое на 0,5-1,4 °C в связи с использованием в модели не совсем адекватных начальных и граничных условий из-за нехватки данных полевых исследований в период от разрушения ледостава до начала развития термобара. В придонных слоях расчетные температуры близки к измеренным, из-за чего результаты моделирования показывают несуществующую прямую стратификацию в теплоактивной зоне. Активное ветровое перемешивание способствует формированию гомотермии как в теплоактивной, так и в теплоинертной зоне.

Дальнейшая работа будет направлена на улучшение модели за счет внесения детальных сведений по распределению гидрофизических и атмосферных параметров. Для моделирования сложных процессов и явлений, происходящих в небольших водоемах, необходимо большое количество исходных данных.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Государственный водный кадастров. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Минск, 1964-2023.
2. Гурьянова Л. В. Особенности распределения температуры воды в малом озере-охладителе ТЭС // Вестник Белорусского государственного университета имени В. И. Ленина. Серия 2: Химия. Биология. География, 1989, с. 57-60.
3. Квон В. И., Квон Д. В. Численный анализ механизма глубокого проникновения поверхностных вод в прибрежной зоне озера в период весенне-летнего термобара // Вычислительные технологии, 1997, № 5, с. 46-56.
4. Овчинникова Т. Э., Бочаров О. Б. О влиянии минерализованных теплых вод притока на развитие весенне-летней конвекции в глубоком озере // Вычислительные технологии, 2006, № 1, с. 63-72.
5. Паспортизация озер Белоруссии: отчет о НИР (ч. 1) / рук. О. Ф. Якушко. Минск, 1977. 138 с.
6. Тихомиров А. И. Термика крупных озер. Ленинград: Наука, 1982. 232 с.
7. Форель Ф. А. Руководство по озероведению (общая лимнология). Санкт-Петербург, 1912. 196 с.
8. Цветова Е. А. Численное моделирование гидродинамических процессов, ответственных за распространение загрязняющих примесей в глубоком водоёме // Вычислительные технологии, 1997, № 2, с. 102-108.
9. Цыденов Б. О., Старченко А. В. Численная модель взаимодействия систем «река – озеро» на примере весеннего термобара в озере Камлупс // Вестник томского государственного университета. Математика и механика, 2013, № 5 (25), с. 102-115.
10. Blokhina N. S., Ordanovich A. E. Model of Formation and Development of Spring Thermal Bar // Water Resources, 2001, vol. 28, no. 2, pp. 201-204.
11. Blokhina N. S. The influence of wind on the development of a thermal bar and currents in a small reservoir during melting of its ice cover // Moscow University Physics Bulletin, 2013, no. 4, p. 324.
12. Farrow D. A Model of the Thermal Bar in the Rotating Frame Including Vertically Non-Uniform Heating // Environmental Fluid Mechanics, 2002, no. 3, pp. 197-218.

13. Holland P.R., Kay A., Botte V. A Numerical Study of the Dynamics of the Riverine Thermal Bar in a Deep Lake // *Environmental Fluid Mechanics*, 2001, no. 1, pp. 311-332.
14. Holland P.R., Kay A., Botte V. Numerical modelling of the thermal bar and its ecological consequences in a river-dominated lake // *Journal of Marine Systems*, 2003, pp. 61-81.
15. Malm J. *Thermal Bar Dynamics – Springtime Thermoand Hydrodynamics in Large Temperate Lakes*. PhD Thesis. Rep. No. 1012. Dept. of Water Resources Eng., Lund Univiversity, Sweden, 1994.
16. Tsydenov B. O., Sukhovilo N. Yu., Trunov N. S., Degi D. V. Numerical modeling of the dynamics of the spring thermal bar in Lake Dolgoe (Belarus): preliminary results // *E3S Web of Conferences*, 2024, vol. 510, pp. 8.
17. *Sentinel Hub EO Browser*. – URL: <https://clk.ru/3D3ZGK> (дата обращения: 05.07.2024). – Текст: электронный
18. Tsydenov B. O. A numerical study of the thermal bar in shallow water during the autumn cooling // *Journal of Great Lakes Research*, 2019, vol. 45, no. 4, pp. 715-725.
19. Tsvetova E. A. Effect of the Coriolis force on convection in a deep lake: numerical experiment // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1998, vol. 39, no. 4, pp. 593-599.
20. Tsvetova E. A. Mathematical modelling of Lake Baikal hydrodynamics // *Hydrobiologia*, 1999, no. 407, pp. 37-43.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию: 28.10.2024

Принята к публикации: 01.09.2025

UDC 556.551(476)

DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/3/111-120>

ISSN 1609-0683

## Vertical and Horizontal Distribution of Water Temperature During the Spring Thermal Bar in Lake Dolgoye (Belarus) Based on Measurements and Mathematical Modeling Data

N. Yu. Sukhovilo<sup>1</sup>✉, B. O. Tsydenov<sup>2</sup>, D. B. Vlasova<sup>1</sup>, I. S. Knyazev<sup>1</sup>, N. S. Trunov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University, Republic of Belarus

(4, Nezavisimost' Ave., Minsk, 220030)

<sup>2</sup>National Research Tomsk State University, Russian Federation

(36, Lenin Ave., Tomsk, 634050)

**Abstract.** The purpose is to analyze the vertical and horizontal distribution of water temperature in the Dolgoye Lake during the development of the spring thermal bar in 2024.

**Materials and methods.** At the end of March 2024, during field research at the BSU Research Laboratory of Lake Studies, the spatial distribution patterns of water temperature in the Dolgoye Lake were established. The results of field studies were compared with the results of mathematical modeling.

**Results and discussion.** As a result, it was established that the thermal bar in the Dolgoye Lake existed from March 26 to 31, 2024. During this period, the water temperature near the shores varied from 4 to 8 °C, in the open part of the lake – from 0.8 to 4 °C. Modeling of physical processes showed adequate reproduction of water temperatures on March 30-31, 2024 in the bottom layers of the lake, in the near-surface they were overestimated relative to the observed ones by 0.5-1.4 °C, which is due to the lack of observation data on March 24-29 and underestimation of the role of wind mixing in the formation of the thermal structure of the Lake Dolgoye. To the south of the reach with maximum depth, the calculated temperatures are lower due to the movement of the thermal bar front from all shallow waters, and not only from the side of the stream from the Svyadovo Lake.

**Conclusion.** Due to the shallowness of the Dolgoye Lake compared to the Lakes of Baikal, Ladoga, and others, as well as the orientation of the lake's long axis in the direction of prevailing winds, the direct temperature stratification before the destruction of the thermal bar in the Dolgoye Lake did not have time to form due to very rapid warming against the background of active wind mixing. Surface water temperatures are found to be overestimated, while in the bottom layers they are almost equal to those measured.

**Key words:** Dolgoye Lake, water temperature, spring thermal bar, mathematical modeling.

**Funding:** The research was carried out with the financial support of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research, project No. X23РНФМ-001, and the Russian Science Foundation, project No. 24-47-10001.

**For citation:** Sukhovilo N. Yu., Tsydenov B. O., Vlasova D. B., Knyazev I. S., Trunov N. S. Vertical and Horizontal Distribution of Water Temperature During the Spring Thermal Bar in Lake Dolgoye (Belarus) Based on Measurements and Mathematical Modeling Data. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologiya*, 2025, no. 3, pp. 111-120. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/3/111-120>

© Sukhovilo N. Yu., Tsydenov B. O., Vlasova D. B., Knyazev I. S., Trunov N. S., 2025

✉ Nina Yu. Sukhovilo, e-mail: sukhovilony@bsu.by



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

REFERENCES

1. Gosudarstvennyj vodnyj kadastr. Ezhegodnye dannye o rezhime i resursah poverhnostnyh vod sushi [The State Water Cadastre. Annual data on the regime and resources of land surface waters]. Minsk, 1964-2023. (In Russ.)
2. Gur'janova L. V. Osobennosti raspredelenija temperatury vody v malom ozere-ohladitele TJeS [Features of the water temperature distribution in the small cooling lake of the thermal power plant]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta imeni V.I. Lenina. Serija 2: Himija. Biologija. Geografija*, 1989, pp. 57-60. (In Russ.)
3. Kvon V.I., Kvon D. V. Chislennyj analiz mehanizma glubokogo proniknenija poverhnostnyh vod v pribrezhnoj zone ozera v period vesenne-letnego termobara [Numerical analysis of the mechanism of deep penetration of surface waters in the coastal zone of the lake during the spring-summer thermal heat]. *Vychislitel'nye tehnologii*, 1997, no. 5, pp. 46-56. (In Russ.)
4. Ovchinnikova T. Je., Bocharov O. B. O vlijanii mineralizovannyh teplyh vod pritoka na razvitiye vesenne-letnej konvekciyu v glubokom ozere [The effect of mineralized warm inflow waters on the development of spring-summer convection in a deep lake]. *Vychislitel'nye tehnologii*, 2006, no. 1, pp. 63-72. (In Russ.)
5. Pasportizacija ozer Belorusii: otchet o NIR (ch. 1) [Certification of lakes in Belarus: research report (Part 1)] / ruk. O. F. Jakushko. Minsk, 1977. 138 p. (In Russ.)
6. Tihomirov A. I. Termika krupnyh ozer [Thermology of large lakes]. Leningrad: Nauka, 1982. 232 p. (In Russ.)
7. Forel' F. A. Rukovodstvo po ozerovedeniju (obshhaja limnologija) [Guide to Lake Science (general limnology)]. Saint-Petersburg, 1912. 196 p. (In Russ.)
8. Cvetova E. A. Chislennoe modelirovanie gidrodinamicheskikh processov, otvetstvennyh za rasprostranenie zagrjaznjajushhih primesej v glubokom vodojome [Numerical modeling of hydrodynamic processes responsible for the spread of pollutants in a deep reservoir]. *Vychislitel'nye tehnologii*, 1997, no. 2, pp. 102-108. (In Russ.)
9. Cydenov B. O., Starchenko A. V. Chislennaja model' vzaimodejstvija sistem «reka – ozero» na primere vesennego termobara v ozere Kamloops [Numerical model of the interaction of river – lake systems using the example of a spring thermal tank in Lake Kamloops]. *Vestnik tomskogo gosudarstvennogo universiteta*.
10. Blokhina N. S., Ordanovich A. E. Model of Formation and Development of Spring Thermal Bar. *Water Resources*, 2001, vol. 28, no. 2, pp. 201-204.
11. Blokhina N. S. The influence of wind on the development of a thermal bar and currents in a small reservoir during melting of its ice cover. *Moscow University Physics Bulletin*, 2013, no. 4, p. 324.
12. Farrow D. A Model of the Thermal Bar in the Rotating Frame Including Vertically Non-Uniform Heating. *Environmental Fluid Mechanics*, 2002, no. 3, pp. 197-218.
13. Holland P. R., Kay A., Botte V. A Numerical Study of the Dynamics of the Riverine Thermal Bar in a Deep Lake. *Environmental Fluid Mechanics*, 2001, no. 1, pp. 311-332.
14. Holland P. R., Kay A., Botte V. Numerical modelling of the thermal bar and its ecological consequences in a river-dominated lake. *Journal of Marine Systems*, 2003, pp. 61-81.
15. Malm J. *Thermal Bar Dynamics – Springtime Thermoand Hydrodynamics in Large Temperate Lakes*. PhD Thesis. Rep. No. 1012. Dept. of Water Resources Eng., Lund University, Sweden, 1994.
16. Tsydenov B. O., Sukhovilo N. Yu., Trunov N. S., Degi D. V. Numerical modeling of the dynamics of the spring thermal bar in Lake Dolgoe (Belarus): preliminary results. *E3S Web of Conferences*, 2024, vol. 510, pp. 8.
17. Sentinel Hub EO Browser. – URL: <https://clck.ru/3D3ZGK> (accessed 05.07.2024). – Text: electronic.
18. Tsydenov B. O. A numerical study of the thermal bar in shallow water during the autumn cooling. *Journal of Great Lakes Research*, 2019, vol. 45, no. 4, pp. 715-725.
19. Tsvetova E. A. Effect of the Coriolis force on convection in a deep lake: numerical experiment. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1998, vol. 39, no. 4, pp. 593-599.
20. Tsvetova E. A. Mathematical modelling of Lake Baikal hydrodynamics. *Hydrobiologia*, 1999, no. 407, pp. 37-43.

**Conflict of interests:** The authors declare no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 28.10.2024

Accepted: 01.09.2025

Суховило Нина Юрьевна

Кандидат географических наук, заведующий НИЛ озероведения Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, ORCID: 0000-0003-0629-126X, e-mail: sukhovilony@bsu.by

Цыденов Баир Олегович

Кандидат физико-математических наук, заведующий НИЛ вычислительной геофизики Томского государственного университета, г. Томск, Россия, ORCID: 0000-0003-3042-1378, e-mail: tsydenov@math.tsu.ru

Власова Дарья Борисовна

Младший научный сотрудник НИЛ озероведения Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь, ORCID: 0009-0008-6026-0310, e-mail: vlasovaDB@bsu.by

Князев Иван Сергеевич

Специалист по кадастру и геоинформационным системам ООО «Центр промышленных беспилотных решений «Коптер Бай», г. Минск, Республика Беларусь, ORCID: 0009-0008-0406-4980, e-mail: ivanknyazev0509@gmail.com

Трунов Никита Сергеевич

Младший научный сотрудник НИЛ вычислительной геофизики Томского государственного университета, г. Томск, Россия, e-mail: suslayndel@yandex.ru

Nina Yu. Sukhovilo

Cand. Sci. (Geogr.), Head of the Lake Research Laboratory, Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus, ORCID: 0000-0003-0629-126X, e-mail: sukhovilony@bsu.by

Bair O. Tsydenov

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Computational Geophysics Research Laboratory, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-3042-1378, e-mail: tsydenov@math.tsu.ru

Daria B. Vlasova

Junior Researcher at the Lake Research Laboratory, Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus, ORCID: 0009-0008-6026-0310, e-mail: vlasovaDB@bsu.by

Ivan S. Knyazev

Cadastre and Geoinformation Systems Specialist of the "Centre for Industrial Unmanned Aerial Vehicle Solutions "Copter By" LLC, Minsk, Republic of Belarus, ORCID: 0009-0008-0406-4980, e-mail: ivanknyazev0509@gmail.com

Nikita S. Trunov

Junior Researcher at the Computational Geophysics Research Laboratory, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation, e-mail: suslayndel@yandex.ru