

УДК 504.455; 519.688; 528.88

## МЕТОДИКА ДИСТАНЦИОННОЙ ОЦЕНКИ ТЕРМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОЗЕР ЗОНЫ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

© 2024 г. С. А. Кондратьев<sup>1</sup>, С. Д. Голосов<sup>1</sup>, И. С. Зверев<sup>1</sup>, А. М. Расулова<sup>1,\*</sup>,  
В. Ю. Крылова<sup>1</sup>, А. В. Ревунова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт озероведения Российской академии наук — обособленное структурное подразделение ФГБУН  
“Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук”,  
Санкт-Петербург, Россия

\*e-mail: arasulova@limno.ru

Поступила в редакцию 03.04.2024 г.

После доработки 17.05.2024 г.

Принята к публикации 18.10.2024 г.

Цель исследования — адаптация методики дистанционной оценки гидротермодинамических характеристик неизученных озер к условиям зоны многолетней мерзлоты Европейской территории России. Основа методики — синтез результатов тематического дешифрирования спутниковых снимков, геостатистической оценки морфометрических характеристик озер и математического моделирования термодинамических процессов в них. В качестве объектов исследования рассмотрены водоемы зоны многолетней мерзлоты трех озерных регионов европейской части России — Кольского сегмента Балтийского кристаллического щита, прибрежных равнин Баренцева моря и западного склона Урала, в каждом из которых озерные котловины имеют схожее происхождение. Для определения морфометрических характеристик озер использовались базы данных HydroLakes и WORDLAKE, основанные на материалах дистанционного зондирования, литературных источниках и оценках объемов озер по геостатистическим моделям, базирующимся на топографии поверхности. Основной инструмент достижения поставленной цели — универсальная параметризованная одномерная математическая модель гидротермодинамики озера FLake, дополненная блоком теплообмена на границе вода — дно. Модель включена в прогностическую систему COSMO, используемую для составления прогнозов погоды на всей территории страны как средство оценки влияния пресноводных озер на локальный климат. Для задания климатических входных данных в модели использовались данные реанализа семейства ERA5. Выполнены имитационные термогидродинамические расчеты для точек, репрезентативных для рассмотренных озерных регионов в пределах зоны многолетней мерзлоты. Показано, что адаптированная к условиям многолетней мерзлоты методика позволяет оценивать теплообмен в системе атмосфера — лед — водная масса — донные отложения, условия перемешивания и вертикальное распределение температуры в воде и донных отложениях, а также ледовый режим озер.

**Ключевые слова:** озерный регион, многолетняя мерзлота, математическая модель, теплоперенос в воде и донных отложениях, ледовый покров, реанализ

DOI: 10.31857/S2587556624060025, EDN: ALARYU

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большинство озер площадью до 100 км<sup>2</sup> зоны многолетней мерзлоты России являются неизученными и малоизученными из-за многочисленности и труднодоступности (Румянцев и др., 2021). Сказанное негативно влияет на планирование хозяйственной деятельности в северных регионах, а также на обоснованность прогнозов возможных изменений термических характеристик озер и их донных отложений в условиях климатических изменений. Отсутствие инструментов и методик коли-

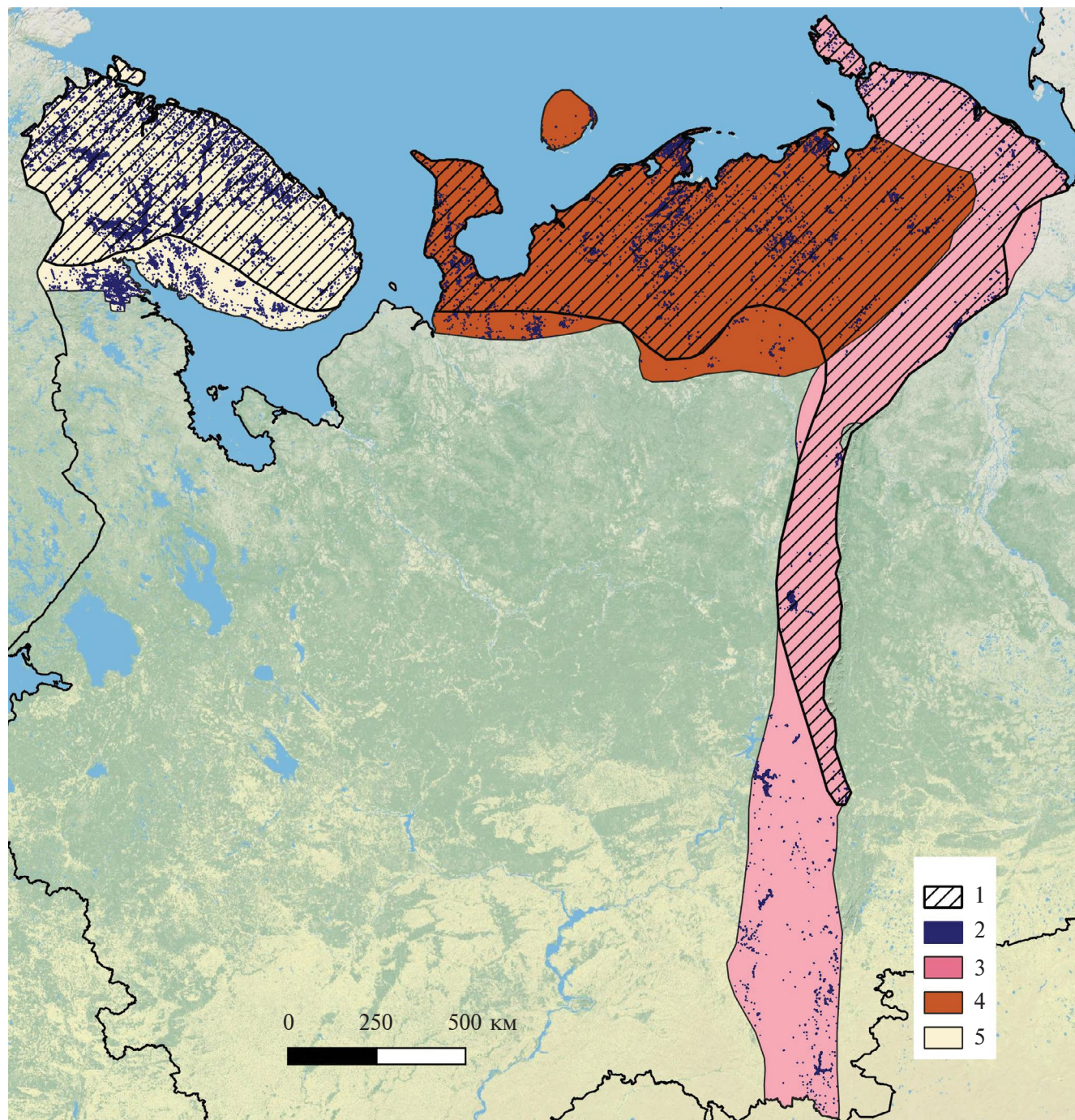
чественной оценки морфометрических параметров неисследованных озер северных регионов и многолетней мерзлоты, в частности, затрудняет точную оценку их термического режима, который напрямую влияет на текущее состояние их экосистем.

В Институте озероведения РАН разработана методика приближенной оценки гидротермодинамических (ГТД) характеристик неизученных озер российской части тундры по данным спутниковой съемки, с использованием геостатистических методов анализа морфометрических параметров озер и результатов математического

моделирования ГТД водных объектов (Zverev et al., 2023). При этом не требуются контактные измерения, что крайне важно для труднодоступных и малоизученных северных территорий нашей страны. Целью настоящего исследования является адаптация методики к условиям зоны многолетней мерзлоты озерных регионов Европейской территории РФ с учетом сезонного промерзания донных отложений озер.

## ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами настоящего исследования являются континентальные озера, находящиеся в зоне многолетнемерзлых пород различной мощности европейской части России. В соответствии с классификацией, предложенной в (Измайлова, 2018), эту зону практически полностью покрывают три озерных региона — Кольский сегмент Балтийского кристаллического щита,



**Рис. 1.** Схема распространения многолетнемерзлых пород на Европейской территории России: 1 — многолетнемерзлые породы различной мощности, 2 — озера. Озерные регионы: 3 — Уральская горная страна (западный склон), 4 — Прибрежные равнины Баренцева моря, 5 — Кольский сегмент Балтийского кристаллического щита. *Источник:* (Измайлова, 2018; Национальный ..., 2007).



прибрежные равнины Баренцева моря, Западный склон Уральской горной страны (рис. 1).

Границы распространения многолетнемерзлых пород построены на основе материалов Национального атласа России (Национальный ..., 2007). Следует помнить, что границы и типы мерзлоты существенно зависят от климатических воздействий и постоянно уточняются (Obu et al., 2019).

Одно из основных различий между регионом Кольского сегмента Балтийского кристаллического щита и двумя другими озерными регионами проявляется в развитии мерзлоты. Отличия озерных регионов во многом связаны с геоморфологическими особенностями и историей их развития. Для Кольского полуострова последним стала осташковская (поздневалдайская) стадия последнего оледенения [низменные участки территории освободились от льда ~11 тыс. л. н. (Korsakova et al., 2020)], для севера Ненецкого автономного округа — ранневалдайская стадия [не позднее 60 тыс. л. н. (Svendsen et al., 2004)]. Вследствие этого на Кольском полуострове до сих пор наблюдаются явления гляциоизостазии, обнаружены следы активных сейсмотектонических событий конца позднего плейстоцена — начала голоцена (Николаева, Евзеров, 2017), что сыграло свою роль в образовании обширных и глубоких озерных котловин.

Суровость геокриологических условий возрастает в восточном направлении, соответственно понижаются и характерные среднегодовые температуры пород. На Кольском полуострове распространение мерзлоты редкоостровное, в основном она приурочена к торфяникам. Существование островов мерзлых пород в Хибинских и Ловозерском горных массивах возможно выше отметок 700–900 м над ур. м., среднегодовые температуры мерзлых пород близки к нулю. Большая часть территории Канино-Тиманского региона расположена в зоне островного распространения мерзлоты, а севернее Каниного Камня — прерывистого. В пределах Большеземельского региона выделяют области сплошного, прерывистого и островного распространения многолетнемерзлых пород, среднегодовые температуры могут опускаться до  $-5^{\circ}\text{C}$ . Под озерными котловинами могут существовать талики (Геокриология, 1988).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основные этапы дистанционной оценки характеристик неизученных озер сводятся к следующему алгоритму.

- С использованием средств дистанционного зондирования Земли дешифрируется интересующий объект, находятся его географические координаты и площадь водной поверхности озера.

- На основе геостатистических взаимосвязей между морфометрическими характеристиками для однородной группы водных объектов оценивается глубина озера.

- По географическим координатам водного объекта из баз данных метеорологического реанализа извлекается метеоинформация требуемого для последующих расчетов разрешения.

- Глубина озера и метеоинформация являются входными данными для расчетов теплообмена в системе атмосфера — лед — водная масса — донные отложения, условий перемешивания и вертикального распределения температуры в воде и донных отложениях, а также ледового режима озер по ГТД модели FLake.

**Методы дистанционного зондирования** позволяют по спутниковым снимкам на территории исследуемых озерных регионов дешифрировать около 400 тыс. озер площадью больше  $0.1 \text{ км}^2$  (Измайлова, 2018) из них 9007 имеются в базе данных HydroLakes (Messenger et al., 2016). Поскольку при построении глубин озер в базе данных HydroLakes не учитывались такие зональные факторы, как климат, и азональные, такие как происхождение озерной котловины, в рамках региональных геостатистических зависимостей могут быть отклонения от реальных морфометрических параметров водоемов. Классификация водоемов по озерным регионам с последующей идентификацией аномальных значений и сравнение с реперными позволили компенсировать отсутствие в HydroLakes учета региональных особенностей формы озерных котловин. В качестве реперных водоемов выбраны около 200 морфометрически изученных озер с известным генезисом котловин из базы данных WORLDLAKE (Kochkov and Ryanzhin, 2016). Отклонение между реперными озерами базы WORLDLAKE и ими же в базе данных HydroLakes составило около 2% по глубине.

Морфометрические параметры озерных котловин, как и климатические условия, оказывают сильное влияние на перемешивание водных масс. Для анализа формы озерной котловины использовались следующие морфометрические параметры: площадь поверхности озера, длина береговой линии, коэффициент изрезанности береговой линии, объем озера, средняя глубина, показатель удельного водосбора, показатель открытости и коэффициент глубинности. Предварительный статистический анализ морфометрических параметров водоемов приведен в табл. 1. Наиболее распространенными озерами (примерно 80%) во всех регионах являются водоемы площадью менее  $1 \text{ км}^2$  ( $0.26\text{--}0.31 \text{ км}^2$ ) с характерными для них глубинами 4–6 м. При этом наиболее глубокие озера наблюдаются в регионе западного склона Уральской горной страны, а наименее — в регионе прибрежных равнин Баренцева моря.

Таблица 1. Статистические оценки морфометрических характеристик водоемов различных озерных регионов

| Характеристика                                                    | Мин. | Макс.             | Среднее          | Медиана           | Стандартное отклонение | Дисперсия         | Асимметрия | Экссесс           |
|-------------------------------------------------------------------|------|-------------------|------------------|-------------------|------------------------|-------------------|------------|-------------------|
| Кольский сегмент Балтийского кристаллического щита ( $N = 3558$ ) |      |                   |                  |                   |                        |                   |            |                   |
| $S$                                                               | 0.10 | $1.06 \cdot 10^3$ | 2.21             | 0.31              | 25.12                  | 630.96            | 30.61      | $1.10 \cdot 10^3$ |
| $l$                                                               | 1.33 | $1.22 \cdot 10^3$ | 5.85             | 2.56              | 30.85                  | 951.92            | 27.76      | 920.98            |
| $A$                                                               | 1.07 | 10.58             | 1.41             | 1.30              | 0.45                   | 0.20              | 8.40       | 121.26            |
| $V$                                                               | 0.17 | $1.15 \cdot 10^4$ | 28.88            | 1.59              | 396.24                 | $1.57 \cdot 10^5$ | 24.50      | 645.44            |
| $H_{avg}$                                                         | 1.60 | 87.90             | 5.83             | 5.10              | 3.51                   | 12.29             | 6.24       | 97.15             |
| $C$                                                               | 0.10 | $1.78 \cdot 10^4$ | 179.77           | 5.10              | $1.08 \cdot 10^3$      | $1.18 \cdot 10^6$ | 11.09      | 139.63            |
| $\Delta C$                                                        | 0.16 | $7.11 \cdot 10^4$ | 312.79           | 11.86             | $2.28 \cdot 10^3$      | $5.09 \cdot 10^6$ | 16.79      | 380.29            |
| $S/H_{avg}$                                                       | 0.01 | 104.28            | 0.25             | 0.06              | 2.10                   | 4.43              | 37.48      | $1.72 \cdot 10^3$ |
| $\alpha$                                                          | 1.00 | 29.27             | 7.64             | 7.18              | 3.11                   | 9.65              | 1.20       | 3.14              |
| Прибрежные равнины Баренцева моря ( $N = 2828$ )                  |      |                   |                  |                   |                        |                   |            |                   |
| $S$                                                               | 0.10 | 185.58            | 0.93             | 0.28              | 4.98                   | 24.76             | 26.64      | 874.62            |
| $l$                                                               | 1.29 | 124.67            | 3.56             | 2.36              | 5.20                   | 27.01             | 12.23      | 226.15            |
| $A$                                                               | 1.08 | 3.75              | 1.31             | 1.24              | 0.21                   | 0.05              | 3.50       | 20.46             |
| $V$                                                               | 0.07 | $2.81 \cdot 10^3$ | 5.86             | 1.21              | 60.51                  | 3661.82           | 38.24      | $1.68 \cdot 10^3$ |
| $H_{avg}$                                                         | 0.50 | 54.50             | 4.66             | 4.10              | 2.92                   | 8.52              | 3.99       | 40.48             |
| $C$                                                               | 0.10 | $3.10 \cdot 10^5$ | 416.98           | 2.10              | $1.00 \cdot 10^4$      | $1.00 \cdot 10^8$ | 30.43      | 929.05            |
| $\Delta C$                                                        | 0.05 | $3.05 \cdot 10^6$ | $1.6 \cdot 10^3$ | 5.71              | $5.84 \cdot 10^4$      | $3.41 \cdot 10^9$ | 50.54      | $2.62 \cdot 10^3$ |
| $S/H_{avg}$                                                       | 0.01 | 54.52             | 0.29             | 0.06              | 1.71                   | 2.94              | 21.94      | 599.45            |
| $\alpha$                                                          | 0.27 | 21.92             | 6.65             | 6.22              | 3.44                   | 11.84             | 0.73       | 0.63              |
| Западный склон Уральской горной страны ( $N = 1052$ )             |      |                   |                  |                   |                        |                   |            |                   |
| $S$                                                               | 0.10 | 88.60             | 0.28             | 1.01              | 4.23                   | 17.89             | 14.31      | 247.51            |
| $l$                                                               | 1.29 | 257.79            | 2.60             | 4.40              | 9.53                   | 90.91             | 19.35      | 484.73            |
| $A$                                                               | 1.06 | 7.73              | 1.35             | 1.48              | 0.45                   | 0.20              | 4.43       | 40.88             |
| $V$                                                               | 0.10 | 1628.77           | 1.10             | 8.47              | 60.67                  | 3680.46           | 20.26      | 500.28            |
| $H_{avg}$                                                         | 0.90 | 29.10             | 3.90             | 4.75              | 3.09                   | 9.57              | 2.33       | 9.13              |
| $C$                                                               | 0.10 | $6.51 \cdot 10^4$ | 6.80             | 554.10            | $4.11 \cdot 10^3$      | $1.69 \cdot 10^7$ | 11.10      | 134.37            |
| $\Delta C$                                                        | 0.04 | $3.12 \cdot 10^5$ | 13.19            | $1.90 \cdot 10^3$ | $1.71 \cdot 10^4$      | $2.92 \cdot 10^8$ | 12.82      | 183.38            |
| $S/H_{avg}$                                                       | 0.01 | 10.13             | 0.08             | 0.20              | 0.56                   | 0.31              | 11.11      | 167.16            |
| $\alpha$                                                          | 0.79 | 23.45             | 5.75             | 6.57              | 3.68                   | 13.55             | 1.15       | 1.40              |

Примечание:  $S$  — площадь зеркала (км<sup>2</sup>),  $l$  — длина береговой линии,  $A$  — изрезанность береговой линии,  $V$  — объем озера (км<sup>3</sup>),  $H_{avg}$  — средняя глубина (м),  $C$  — площадь водосбора (км<sup>2</sup>),  $\Delta C$  — удельный водосбор  $\Delta C = C/S$ ,  $S/H_{avg}$  — показатель открытости,  $\alpha$  — показатель “глубинности” озера,  $\alpha = \frac{H_{avg}}{S^{1/3}}$ ,  $N$  — количество водоемов в выборке.

ГТД условия в водоеме можно оценить из морфометрических параметров. Наиболее наглядно их описывает показатель открытости (см. табл. 1). Показатель открытости озерной котловины характеризует степень устойчивости водных масс к метеорологическим факторам и позволяет судить о динамическом перемешивании водной массы и возможности возникновения термической стратификации. Чем меньше показатель открытости, тем меньше влияет

атмосфера на водную массу озера. Для всех озерных регионов от 65 до 77% водоемов относятся к слабо открытым (показатель открытости менее 0.1), при этом их наибольшее количество среди озер западного склона Уральской горной страны. На водоемы с показателем открытости больше 5.0 (хорошо открытые) приходится менее 1% водоемов в каждом из регионов.  
Для получения средних глубин водоемов, которые являются входными параметрами мо-

дели, строились зависимости  $H(S)$ . Однако при построении зависимостей  $H(S)$  для исходных выборок коэффициент достоверности аппроксимации был примерно 11–17%, что является неудовлетворительным для их дальнейшего использования в модели. Низкий коэффициент достоверности аппроксимации связан с неоднородностью выборки, наличием в ней единичных водоемов, существенно отличающихся по своим морфометрическим параметрам от общей массы.

**Геостатистические методы** обработки выборок были применены для более точной оценки глубин и их взаимосвязи с площадью водоема. Такие методы исследований получили широкое распространение в геологии (Бабушкина и др., 2012; Assibey-Bonsu, 2016), экологии (Паркин и др., 2005) и лимнологии (Chen et al., 2020; Sarah et al., 2011; Szatmári et al., 2022). В настоящее время существует ряд моделей для оценки глубин и объемов озер косвенными методами с использованием геостатистических методов как глобального (Khazaei et al., 2022; Lehner and Döll, 2004; Messenger et al., 2016), так и регионального масштаба (Winslow et al., 2015). Однако глобальные модели на региональном уровне работают с существенными погрешностями. Выбор региональных геоданных в данной работе велся на основе ландшафтного районирования озерных регионов, позволяющего учитывать такие факторы как рельеф, климатические условия, гидрографию, почвенный покров, растительность и т.д. в районах распространения многолетней мерзлоты европейской части России. В исследуемом регионе были выделены генетически единые геосистемы (Румянцев и др., 2015), включающие схожие по происхождению и, соответственно, по морфометрическим параметрам водоемы. Эта методология хорошо зарекомендовала себя при классификации лимнологически неизученных водных объектов (Измайлова, 2018).

Статистический анализ морфометрических параметров водоемов по трем озерным регионам, покрывающим многолетнемерзлые территории Европейской территории России, показал, что распределения каждого из них не являются гауссовскими, имеют правостороннюю асимметрию и положительный эксцесс (см. табл. 1). Распределения такого вида плохо поддаются анализу на идентификацию выбросов с помощью классических статистических критериев (Измайлова и др., 2023). В связи с этим поиск аномальных значений производился с помощью модели двухэтапной кластеризации TwoStep Cluster (Bacher et al., 2004; Shih et al., 2010). Метод двухэтапной кластеризации поиска основан на иерархической кластеризации и состоит из двух этапов: 1) первичное разделение всех данных на максимально возможное число кластеров и

2) минимизация количества кластеров. После чего каждая запись выборки оценивается на принадлежность к тому или иному кластеру модели по ее удаленности от центров кластеров. Среди всей выборки озер по базам HydroLakes было идентифицировано 256 аномальных объектов, которые не учитывались в дальнейшем анализе. Удаление из выборок аномальных значений позволило увеличить коэффициент достоверности аппроксимации примерно до 25–30%, что для некоторых регионов уже можно оценивать, как “умеренную”, но для некоторых регионов зависимости  $H(S)$  не достигали достаточной точности для их дальнейшего применения в модели.

Поскольку большинство озер в каждом из регионов имеют площадь до 1 км<sup>2</sup> выборки были разделены в соответствие с классификацией П.В. Иванова озер по площадям (Иванов, 1948). Данное деление позволило добиться удовлетворительного для применения в модели зависимостей  $H(S)$  коэффициента достоверности аппроксимации.

**Данные метеорологического реанализа** использовались для задания атмосферного воздействия (“форсинга”) на озера. Реанализ объединяет данные детерминированного моделирования с натурными наблюдениями по всему миру в полный и согласованный набор. Принцип такого объединения данных основан на методе ассимиляции, используемый в центрах численного прогнозирования погоды, где каждые несколько часов предыдущий прогноз оптимальным образом комбинируется с новыми доступными наблюдениями для получения новой наилучшей оценки состояния атмосферы. При этом реанализ не связан с необходимостью оперативно выпускать метеорологические прогнозы, а, следовательно, есть больше времени для сбора наблюдений и учета улучшенных версий исходных наблюдений, что благоприятно сказывается на качестве продукта. В настоящей работе в качестве входной информации для гидротермодинамического моделирования служили данные реанализа семейства ERA5<sup>1</sup>, который представляет собой ряды восстановленных значений метеорологических параметров для всего земного шара, которые обновляются ежедневно с задержкой около 5 дней. ERA5 — это пятое поколение реанализа для глобального климата и погоды за последние 8 десятилетий. Данные доступны с 1940 г. по настоящее время. ERA5 предоставляет почасовые оценки для большого числа параметров атмосферы, океанических волн и поверхности земли. Временной шаг между сроками “наблюдений” составляет 6 ч, пространственное разрешение реанализа — 0.25° по широте и долготе. Выборка необходимых

<sup>1</sup> Информация о наборе данных ERA5. <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5> (дата обращения 26.04.2024).



для расчетов данных производится по координатам расчетной точки. Для облегчения работы многих климатических приложений рассчитываются также и среднемесячные значения гидрометеорологических параметров.

Рассматриваемые в настоящей работе озера, расположенные в зоне залегания многолетнемерзлых пород, обладают одной важной особенностью — в них практически всегда присутствуют горизонтальная однородность поля температуры и преобладание процессов вертикального переноса тепла над адвективными. При моделировании термического режима водоемов этого класса зачастую достаточно использовать простые одномерные модели, основанные на интегрировании уравнения вертикальной диффузии тепла и различных способах представления вертикального распределения температуры. Такие модели, как правило, основаны на ясных физических предпосылках, не требуют задания коэффициентов вертикального турбулентного обмена, просты в реализации и удобны для проведения численных экспериментов. К классу таких моделей как раз относится ГТД модель озера FLake.

**Гидротермодинамическая модель озера FLake<sup>2</sup>** является составной частью предложенной методики и разработана совместными усилиями сотрудников Института озероведения РАН, Института водных проблем Севера РАН, Института водной экологии и внутреннего рыбоводства Германии (IGB) и Службы погоды Германии (DWD) (Golosov and Kirillin, 2010; Kirillin et al., 2011; Mironov et al., 2010). Модель представляет собой универсальную параметризованную одномерную математическую модель ГТД процессов в озере, в которой реализованы результаты исследований, полученные в ходе многолетних натурных и лабораторных исследований, выполненных на Лимнологической станции Института озероведения РАН, а также последние мировые достижения в области физической лимнологии. В настоящее время FLake служит базовым инструментом для разработки моделей функционирования водных экосистем и формирования качества воды в природных и искусственных водоемах, используется как учебное пособие при подготовке специалистов экологов и гидрометеорологов. В качестве метода учета влияния озер на формирование локальных климатических условий широко внедрена в практику численного прогноза погоды в метеорологических организациях разных стран и Международного Европейского Центра среднесрочных прогнозов погоды (Mironov, 2008). Кроме того, прогностическая система COSMO<sup>3</sup>, используемая и в на-

шей стране для составления прогнозов погоды на всей территории РФ, также включает FLake в качестве средства оценки влияния пресноводных озер на локальный климат по всему миру. Из этого следует, что модель априори может использоваться на неизученных малых и средних водоемах озерных регионов, рассматриваемых в настоящей работе.

На рис. 2 схематично представлено вертикальное распределение температуры в системе снег — лед — водная масса — донные отложения, временная динамика которого рассчитывается в модели. Озеро в модели имеет трехслойную структуру. В период открытой воды (“Лето”) сверху находится верхний перемешанный слой (ВПС) толщиной  $h$ . ВПС из-за постоянно присутствующего ветрового/конвективного перемешивания имеет одинаковую по глубине температуру  $T_s$ . Ниже ВПС располагается зона термоклина толщиной  $D-h$ . В термоклине температура воды уменьшается до значения  $T_D$  — температуры воды на границе раздела вода — дно. При этом водная масса озера имеет устойчивую плотностную стратификацию, что препятствует проникновению перемешивания, а вместе с ним и тепла в придонную область.

Водная масса озера граничит с деятельным слоем донных отложений, толщина которого  $L-D$  определяется наличием в нем сезонных колебаний температуры. Обычно за нижнюю границу деятельного слоя донных отложений принимается глубина, на которой внутригодовые колебания температуры не превышают 10% от колебаний  $T_D$  — температуры на границе вода — дно. Поскольку на этой глубине сезонные колебания температуры считаются ничтожно малыми, то температура на нижней границе деятельного слоя  $T_L$  принимается постоянной. Толщина самого слоя в озерах умеренных широт варьирует в диапазоне 3–5 м.

С момента образования льда (“Зима”) в модели рассчитываются временная динамика толщины льда  $li$  и снежного покрова  $ls$  на нем, а также вертикальный профиль температуры как в снегу, так и во льду. В течение зимнего периода температура на границе лед — вода равна температуре замерзания воды — 0°C. Водная масса озера в зимний период в отличие от летнего имеет обратную температурную стратификацию, т.е. температура воды с глубиной увеличивается. Ввиду того, что охлаждение озера происходит вследствие его взаимодействия с атмосферой, т.е. сверху, донные отложения оказываются в зимний период теплее вышележащей водной массы. Это вызывает так называемый “эффект подледного прогрева озера”, когда из-за перераспределения тепла между теплыми донными отложениями и холодной водной мас-

<sup>2</sup> ГТД модель Flake. <https://www.lakemodel.net> (дата обращения 15.03.2024).

<sup>3</sup> Прогностическая система COSMO, Росгидромет. <https://www.meteorf.gov.ru/product/cosmo/> (дата обращения 15.03.2024).

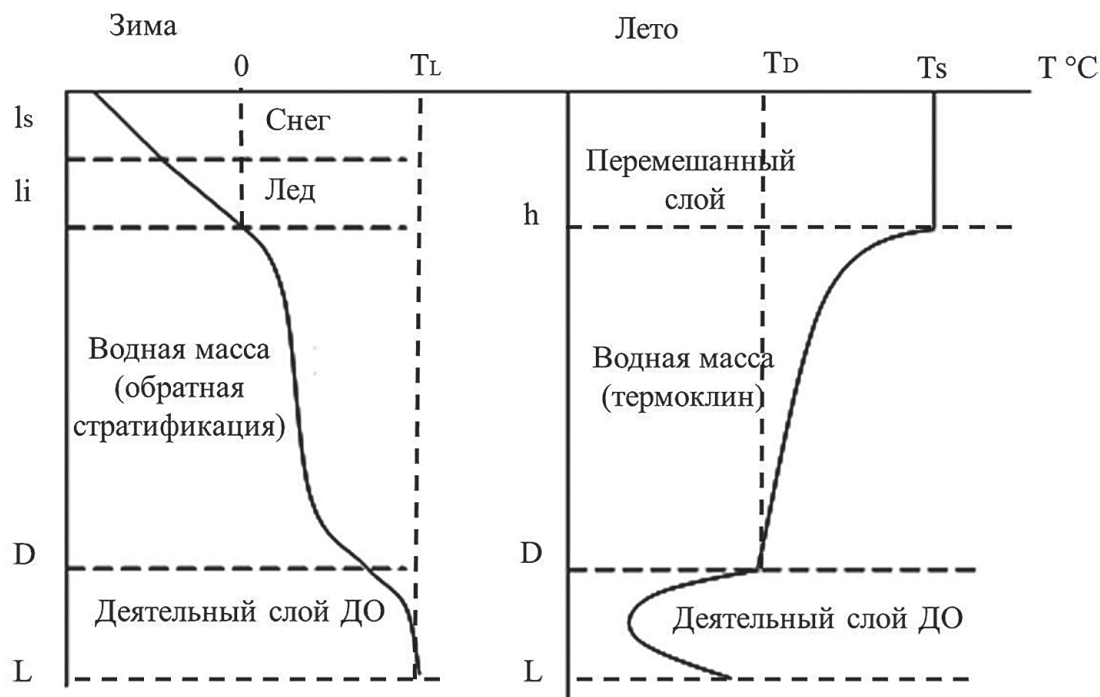


Рис. 2. Схема вертикального профиля температуры  $T$  в системе снег — лед — водная масса — донные отложения, реализованная в модели FLake.

сой в последней температура растет в течение всего зимнего периода.

Модель основана на решении одномерного нестационарного уравнения теплопроводности как в водной массе, так и в донных отложениях. При этом вертикальные профили описываются автомодельными представлениями в обеих средах, что позволяет избежать расчета/задания коэффициентов турбулентного/молекулярного обмена, а саму систему уравнений свести к обыкновенным дифференциальным уравнениям. Последнее делает модель высокоэффективной с точки зрения затрат вычислительного времени.

Основной особенностью применения модели к озерам, расположенным в зонах залегания многолетнемерзлых пород — “вечной мерзлоты” — является то, что деятельным слоем донных отложений становится так называемый слой сезонного оттаивания (ССО), который не является постоянной величиной и испытывает выраженные сезонные колебания. В период летнего прогрева он увеличивается за счет поступления тепла из атмосферы через водную массу, тогда как в зимний период ССО деградирует за счет отдачи тепла в воду. Таким образом величина  $L$  (см. рис. 2) становится дополнительной переменной модели. В ходе выполнения настоящей работы модель FLake была дополнена уравнением для расчета толщины деятельного слоя донных отложений — в данном случае толщины ССО (Zdorovenkov et al., 2020).

Несмотря на обширные возможности модели и ее универсальность, водные объекты, к кото-

рым применяется модель, должны удовлетворять следующим условиям:

1) протяженность не должна быть настолько велика, чтобы породить значительные климатические различия между отдельными участками акватории, и не настолько мала, чтобы вторичная ветровая циркуляция играла очень существенную роль;

2) дно должно быть более или менее ровным и горизонтальным, чтобы его можно было аппроксимировать горизонтальной плоскостью;

3) адвективные процессы не должны вносить существенного вклада в турбулентное перемешивание.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для получения зависимостей средней глубины озера от его площади получены аппроксимационные кривые на основе анализа обработанных данных. Как уже упоминалось выше, наибольшей достоверности аппроксимации удалось добиться при делении озер на три группы по принадлежности к различному диапазону площадей зеркала — 0.1–1.0, 1–10 и 10–100 км<sup>2</sup> (табл. 2). Теснота связи значений площади озера и его глубины в представленных аппроксимациях оценивается как “умеренная” ( $R^2 = 0.3–0.5$ ) и “заметная” ( $R^2 = 0.5–0.7$ ) (Крылов, Муравьева, 2020).

С целью оценки возможностей модели FLake по выявлению особенностей и закономерностей теплопереноса в озерах зоны многолетней мерзлоты выполнялись имитационные расчеты

**Таблица 2.** Эмпирические зависимости глубины озера  $H$  от его площади  $S$ , полученные в результате статистической обработки баз данных HydroLAKES и WORLDLAKE для рассматриваемых озерных регионов и озер различной площади

| Площадь, км <sup>2</sup>                           | Количество озер в выборке | Зависимость          | Достоверность аппроксимации |
|----------------------------------------------------|---------------------------|----------------------|-----------------------------|
| Прибрежные равнины Баренцева моря                  |                           |                      |                             |
| 0.1–1                                              | 2398                      | $H = 10.712 \cdot S$ | 0.6539                      |
| 1–10                                               | 377                       | $H = 1.5844 \cdot S$ | 0.4312                      |
| 10–100                                             | 25                        | $H = 0.2406 \cdot S$ | 0.3892                      |
| Кольский сегмент Балтийского кристаллического щита |                           |                      |                             |
| 0.1–1                                              | 2761                      | $H = 11.193 \cdot S$ | 0.6939                      |
| 1–10                                               | 551                       | $H = 2.3135 \cdot S$ | 0.5726                      |
| 10–100                                             | 43                        | $H = 0.2731 \cdot S$ | 0.4029                      |
| Уральская горная страна (западный склон)           |                           |                      |                             |
| 0.1–1                                              | 876                       | $H = 15.239 \cdot S$ | 0.597                       |
| 1–10                                               | 196                       | $H = 3.9155 \cdot S$ | 0.4147                      |
| 10–100                                             | 10                        | $H = 0.303 \cdot S$  | 0.3161                      |

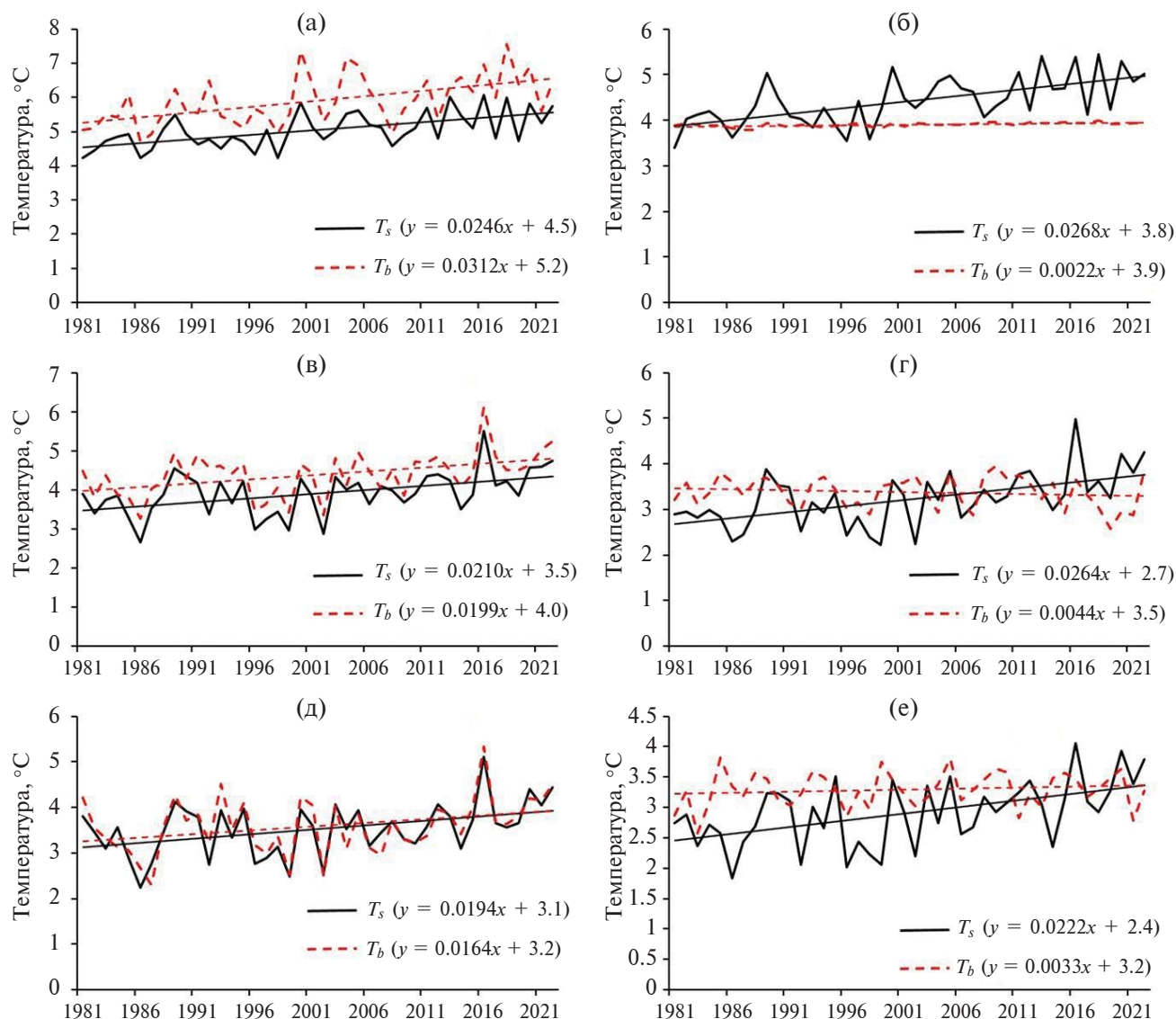
для трех гипотетических областей, расположенных на одной широте и в окрестности следующих точек: 1 – 34.58° в.д., 67.81° с.ш. (Кольский сегмент Балтийского кристаллического щита), 2 – 54.55° в.д., 67.81° с.ш. (прибрежные равнины Баренцева моря), 3 – 59.29° в.д., 67.81° с.ш. (западный склон Уральской горной страны). Координаты расчетных точек выбирались на основе построения центроидов (барицентров полигонов) регионов, с коррекцией на влияние широты (см. рис. 1). Глубины типичных водоемов для каждого из озерных регионов оценивались на основе геостатистических аппроксимационных зависимостей, приведенных в табл. 2. Для охвата всего спектра возможных глубин в расчетах принимались значения минимальной (0.1 км<sup>2</sup>) и максимальной площадей (100 км<sup>2</sup>) зеркала гипотетического озера в рассматриваемом озерном регионе. Таким образом расчеты выполнялись для следующих значений глубин: 1.1 м и 27.0 м (Кольский сегмент Балтийского кристаллического щита), 1.1 м и 24.0 м (прибрежные равнины Баренцева моря), 1.5 м и 30.3 м (западный склон Уральской горной страны). С использованием данных реанализа ERA5 за период с 1980 по 2022 г. рассчитаны многолетние тренды поверхностной и придонной температуры для озер с перечисленными выше глубинами.

На рис. 3 наиболее наглядно прослеживаются тенденции изменения термических характеристик озер в зависимости от глубины (площади) в условиях меняющегося климата каждого из озерных регионов. Общим для всех трех регионов является то, что в них поверхностная и придонная температуры озер с минимальной глубиной в последние сорок лет имеют выра-

женную тенденцию к увеличению. Их скорости увеличения, тем не менее, разнятся от региона к региону — максимальные приходятся на озера Кольского сегмента Балтийского кристаллического щита, минимальные наблюдаются на западном склоне Уральской горной страны. По-другому выглядят тренды для озер с максимальной в рассматриваемых озерных регионах глубиной. В них положительная динамика температур наблюдается только для поверхности, в то время как придонная температура имеет практически нулевые тренды в озерах Кольского сегмента Балтийского кристаллического щита и западного склона Уральской горной страны, а в озерах Прибрежных равнин Баренцева моря этот тренд отрицателен. Объяснением такой ситуации может служить с одной стороны усиливающаяся с прогревом верхних слоев вертикальная плотностная стратификация водных масс, препятствующая поступлению тепла в придонные слои, с другой — охлаждающее на этом фоне влияние многолетнемерзлых пород.

Аналогичные тренды были рассчитаны для толщины льда в озерах рассматриваемых регионов (рис. 4) для озер с минимальными и максимальными глубинами. Ситуация с толщиной льда в озерах выбранных регионов полностью соответствует современным представлениям о потеплении в Арктике. Толщина льда уменьшается в водоемах всех трех регионов, причем скорость уменьшения везде практически одинакова. Образование, нарастание и таяние льда в озерах главным образом является результатом взаимодействия водной массы с атмосферой.



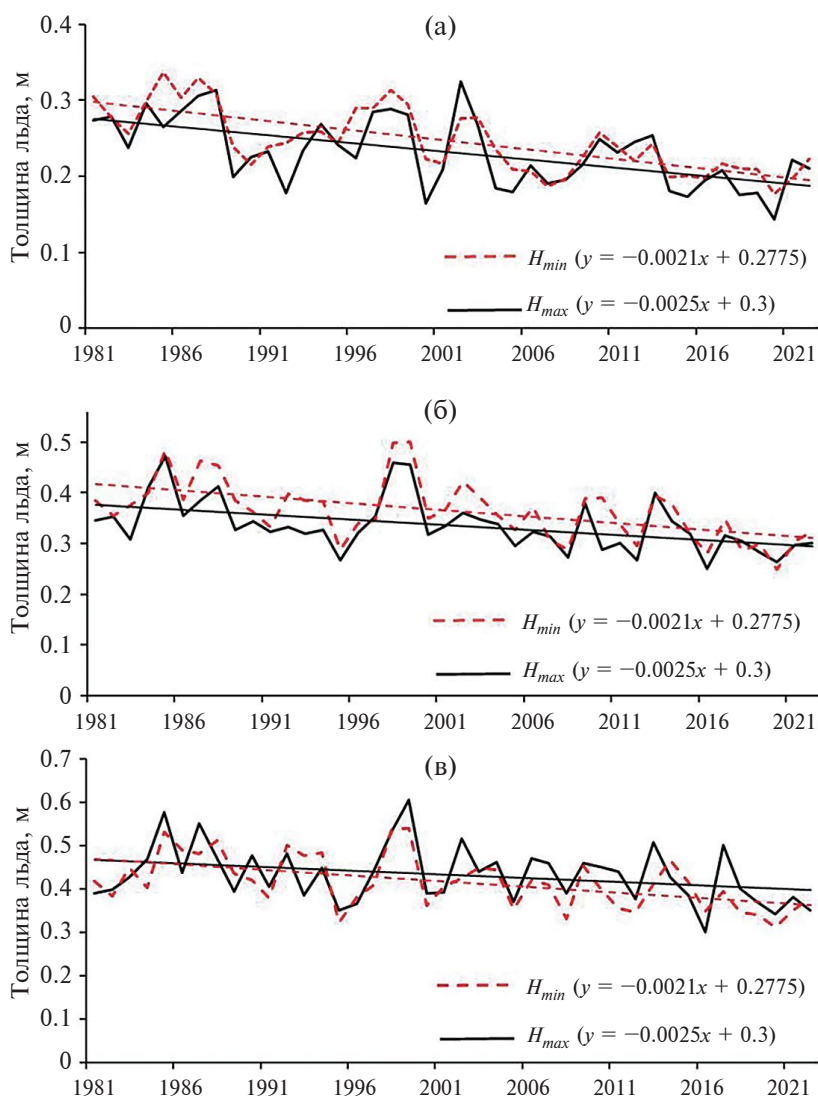


**Рис. 3.** Многолетние тренды поверхностной ( $T_s$ ) и придонной ( $T_b$ ) температуры воды для минимальных (а), (в), (д) и максимальных (б), (г), (е) глубин озера Кольского сегмента Балтийского кристаллического щита (а), (б), прибрежных равнин Баренцева моря (в), (г) и западного склона Уральской горной страны (д), (е).

Для рассматриваемых озерных регионов выполнены оценки особенностей внутригодовой динамики осредненной по глубине температуры воды и среднемесячных значений потока тепла через границу раздела вода — дно для условий среднеклиматического года (рис. 5).

Данные рис. 5 демонстрируют зональность внутригодового хода средней температуры в озерах регионов. Наиболее теплыми являются озера Кольского сегмента Балтийского кристаллического щита, за ними следуют водоемы прибрежных равнин Баренцева моря и западного склона Уральской горной страны. Результат достаточно предсказуем, поскольку в озерах Кольского сегмента Балтийского кристаллического щита проявляется влияние относительно теплого (как минимум незамерзающего) Баренцева моря. Стоит отметить, что максимумы температуры воды синхронны во всех регионах.

Это объясняется широтным эффектом — все модельные озера находятся на одной широте. Результаты расчета теплообмена через границу вода — дно демонстрируют влияние многолетнемерзлых пород на термический режим озера. В озерах всех регионов значительную часть года поток тепла имеет положительные значения, т.е. он направлен из воды в дно. Осенью на короткий период ситуация меняется. В наибольшей степени смена направления потока тепла значима в озерах прибрежных равнин Баренцева моря, где он направлен из донных отложений в воду. Даже в период ледостава, когда в озерах, расположенных вне зоны залегания многолетнемерзлых пород, наблюдается так называемый “эффект подледного прогрева водной массы”, значения потока тепла положительны. Последнее может приводить к образованию льда на поверхности донных отложений в зимний период.



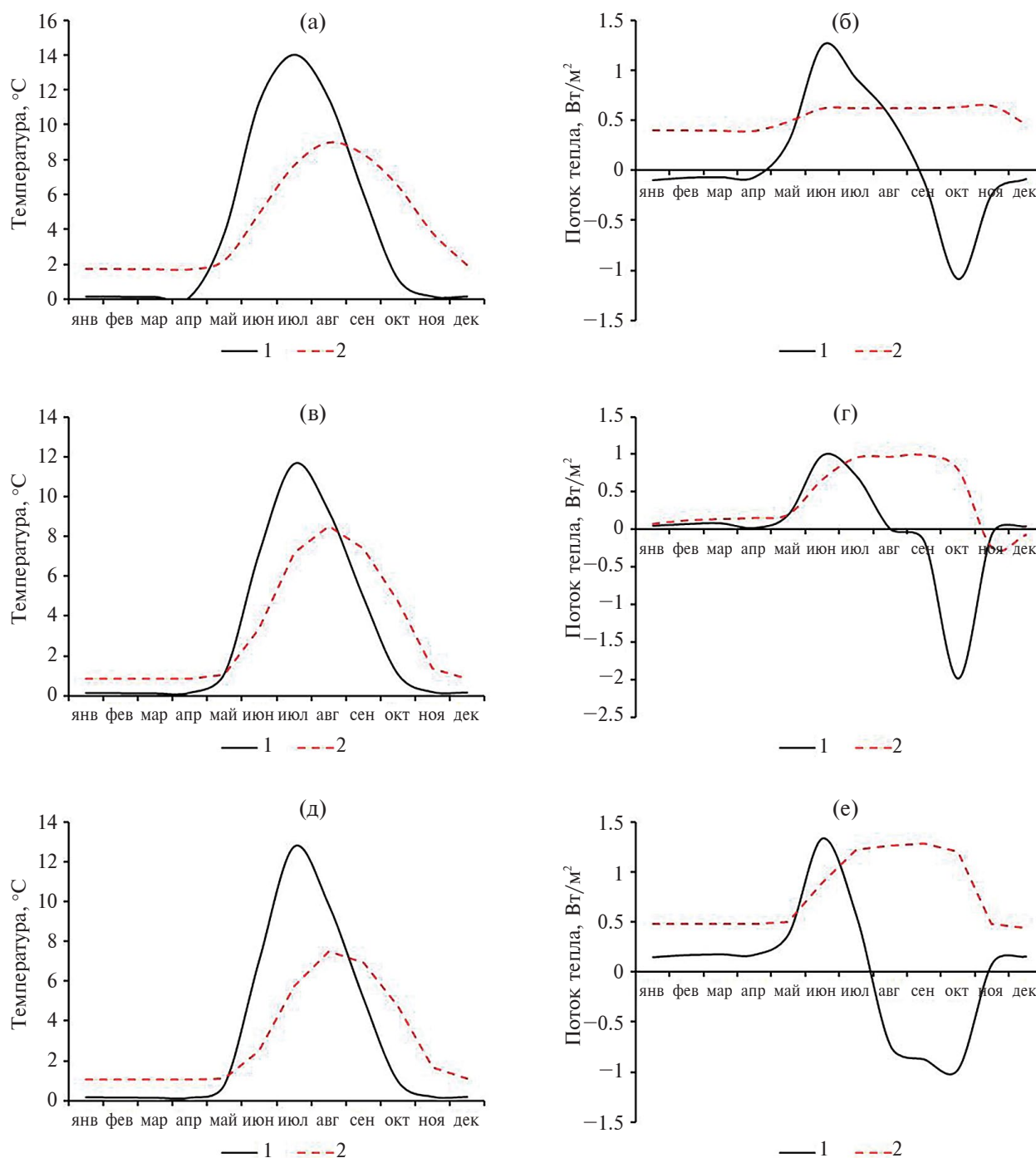
**Рис. 4.** Рассчитанные тренды толщины льда для минимальных ( $H_{min}$ ) и максимальных ( $H_{max}$ ) глубин в озерах Кольского сегмента Балтийского кристаллического щита (а), прибрежных равнин Баренцева моря (б) и западного склона Уральской горной страны (в).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнена адаптация метода дистанционной оценки характеристик неизученных озер к условиям зоны многолетней мерзлоты Европейской территории России. Геоestatистическая оценка морфометрических характеристик озер проведена для трех основных озерных регионов (Кольский сегмент Балтийского кристаллического щита, прибрежные равнины Баренцева моря, западный склон Уральской горной страны) со схожими условиями формирования озерных котловин и ландшафтами. На основе обработанных данных баз HydroLakes и WORLDSLAKЕ для указанных озерных регионов построены аппроксимационные зависимости средней глубины озера от его площади. Параметризованная одномерная математическая модель ГТД процессов FLake дополнена блоком, описывающим теплообмен

на границе вода — дно с учетом наличия многолетнемерзлых пород в донных отложениях.

С использованием данных реанализа ERA5 получены 40-летние тренды в изменчивости поверхностной и придонной температуры озер всех трех регионов, а также толщины льда в них. Результаты расчетов свидетельствуют о том, что в озерах всего диапазона глубин во всех рассматриваемых зонах присутствуют положительные тренды поверхностной температуры воды. В более глубоких озерах (глубиной от 24.0 до 30.3 м) придонная температура имеет либо нулевые, либо отрицательные тренды. Причиной такой ситуации может служить усиливающаяся с прогревом верхних слоев вертикальная плотностная стратификация водных масс, а также охлаждающее влияние многолетнемерзлых пород. Необходимо отметить, что полученные положительные тренды температуры в рассматриваемых регионах подтверждаются



**Рис. 5.** Рассчитанная внутригодовая динамика средней по глубине температуры воды (а), (в), (д) и потока тепла через границу раздела вода — дно (б), (г), (е) для минимальных (1) и максимальных (2) расчетных глубин в водоемах различных озерных регионов: Кольский сегмент Балтийского кристаллического щита (а), (б); Прибрежные равнины Баренцева моря (в), (г); западный склон Уральской горной страны (д), (е).

данными Росгидромета о более высокой скорости потепления в Арктике по сравнению с остальными территориями РФ (Доклад ..., 2021).

Аналогичные тренды для толщины льда также соответствует современным представлениям о потеплении в Арктике. Толщина льда уменьшается в водоемах всех трех регионов, причем скорость уменьшения везде практически одинакова. Образование, нарастание и таяние льда в озерах главным образом является результатом взаимо-

действия водной массы с атмосферой, поэтому полученные результаты скорее отражают тенденции атмосферных климатических изменений.

Расчетными методами получены оценки теплообмена через границу раздела вода — дно для арктических озер при наличии в них многолетнемерзлых пород. Показано, что донные отложения практически в течение всего года поглощают тепло из водной массы, что может приводить к образованию льда на их поверхности



в зимний период. Здесь явным образом прослеживается зависимость от средней глубины озер и их местонахождения. На основании выполненных имитационных расчетов можно заключить что с использованием предложенной усовершенствованной методики приближенной оценки ТГД характеристик неизученных озер получены результаты, отражающие основные закономерности формирования термического режима озер зоны многолетней мерзлоты в рассмотренных озерных регионах Европейской территории России.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке проекта Российского научного фонда № 24-27-00067 “Методика дистанционной оценки характеристик неизученных озер зоны многолетней мерзлоты с использованием спутниковой информации и математического моделирования”.

## FUNDING

The work was supported by the Russian Science Foundation project no. 24-27-00067 “Methodology for remote assessment of the characteristics of unstudied lakes in permafrost zones using satellite information and mathematical modeling”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабушкина Е.В., Русаков В.С., Русаков С.В., Шавнина Ю.Н. Типизация территории методами геостатистического анализа по физико-географическим факторам // Вестн. Пермского ун-та. Математика. Механика. Информатика. 2012. № 1 (9). С. 33–37.
- Вечная мерзлота Кольского полуострова / под ред. И.Я. Баранова. М.: Изд-во АН СССР, 1953. 180 с.
- Геокриология СССР. Европейская территория СССР / ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1988. 358 с.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М.: Росгидромет, 2021. 104 с.
- Иванов П.В. Классификация озер мира по величине и по их средней глубине // Бюл. ЛГУ. 1948. № 20. С. 29–36.
- Измайлова А.В. Озера России. Закономерности распределения, ресурсный потенциал. СПб.: Папирус, 2018. 288 с.
- Измайлова А.В., Корнеева Н.Ю., Расулова А.М. Выявление уникальных озер с использованием геоинформационных систем на примере Ненецкого автономного округа // Изв. Иркутск. гос. ун-та. Сер.: Науки о Земле. 2023. Т. 43. С. 30–45. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.43.30>
- Кравцова В.И. Распространение термокарстовых озер в России в пределах зоны современной мерзлоты // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2009. № 3. С. 33–42.
- Крылов В.Е., Муравьева Н.В. Общая теория статистики: учеб. пособие. Владимир: Изд-во Владимирского гос. ун-та, 2020. 243 с.
- Национальный атлас России. Т. 2. Природа. Экология / гл. ред. А.В. Бородко, гл. ред. тома В.М. Котляков. М.: ПКО “Картография”, 2007. 496 с.
- Николаева С.Б., Евзеров В.Я. К геодинاميке Кольского региона в позднем плейстоцене и голоцене: Обзор и результаты исследований // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология. 2018. № 1. С. 5–14.
- Паркин Р.А., Каневский М.Ф., Савельева Е.А., Демьянов В.В. Пространственно-временная геостатистика на примере данных радиоэкологического мониторинга // Инженерная экология. 2005. № 1. С. 18–32.
- Румянцев В.А., Дробкова В.Г., Измайлова А.В. Озера европейской части России. СПб.: Лема, 2015. 390 с.
- Assibey-Bonsu W. The basic tenets of evaluating the Mineral Resource assets of mining companies, as observed through Professor Danie Krige’s pioneering work over half a century // J.S. Afr. Inst. Min. Metal. 2016. Vol. 116. № 7. P. 635–643. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2016/v116n7a5>
- Bacher J., Wenzig K., Vogler M. SPSS TwoStep Cluster — a first evaluation. Nürnberg: Arbeits- und Diskussionspapiere. Universität Erlangen-Nürnberg, Sozialwissenschaftliches Institut, Lehrstuhl für Soziologie, 2004. 32 p.
- Chen Y., Wu L., Zhang G., Xu Y.J., Tan Z., Qiao S. Assessment of Surface Hydrological Connectivity in an Ungauged Multi-Lake System with a Combined Approach Using Geostatistics and Spaceborne SAR Observations // Water. 2020. Vol. 12. № 10. P. 1–23. <https://doi.org/10.3390/w12102780>
- Golosov S., Kirillin G.A. Parameterized model of heat storage by lake sediments // Environmental Modelling & Software. 2010. Vol. 25. № 6. P. 793–801. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.01.002>
- Khazaei B., Read L.K., Casali M., Sampson K.M., Yates D.N. GLOBathy, the global lakes bathymetry dataset // Sci. Data. 2022. Vol. 9. № 1. P. 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01132-9>
- Kirillin G., Hochschild J., Mironov D., Terzhevik A., Golosov S., Nützmänn G. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage // Environ. Modelling & Software. 2011. Vol. 26. № 5. P. 683–684. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.12.004>
- Kochkov N.V., Ryanzhin S.V. A method of assessing lake morphometric characteristics with the use of satellite data // Water Res. 2016. Vol. 43. № 1. P. 15–20. <https://doi.org/10.1134/s0097807816010103>
- Korsakova O., Tolstobrov D., Nikolaeva S., Kolka V., Tolstobrova A. Lake Imandra depression in the Late Glacial and early Holocene (Kola Peninsula, north-western Russia) // Baltica. 2020. Vol. 33. № 2. P. 177–190. <https://doi.org/10.5200/baltica.2020.2.5>
- Lehner B., Döll P. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands // J. Hydrol. 2004. Vol. 296. № 1–4. P. 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.028>

- Messager M., Lehner B., Grill G., Nedeva I., Schmitt O.* Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach // *Nat. Commun.* 2016. Vol. 7. № 1. Art 13603.  
<https://doi.org/10.1038/ncomms13603>
- Mironov D.V.* Parameterization of Lakes in Numerical Weather Prediction. Description of a Lake Model. COSMO Technical Report No. 11. Offenbach am Main: German Weather Service, 2008. 44 p.
- Mironov D., Heise E., Kourzeneva E., Ritter B., Schneider N., Terzhevik A.* Implementation of the lake parameterization scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO // *Boreal Environ. Res.* 2010. Vol. 15. P. 218–230.
- Obu J., Westermann S., Bartsch A., et al.* Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km<sup>2</sup> scale // *Earth-Science Reviews.* 2019. Vol. 193. P. 299–316.  
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023>
- Rumyantsev V.A., Izmailova A.V., Makarov A.S.* Status of the lake fund of the Arctic zone of the Russian Federation // *Herald of the Russian Academy of Sciences.* 2021. Vol. 91. № 1. P. 26–36.  
<https://doi.org/10.1134/s101933162101007X>
- Sarah S., Jeelani G., Ahmed S.* Assessing variability of water quality in a groundwater-fed perennial lake of Kashmir Himalayas using linear geostatistics // *J. Earth Syst. Sci.* 2011. Vol. 120. P. 399–411.  
<https://doi.org/10.1007/s12040-011-0081-6>
- Shih M.-Yi, Jheng J.-W., Lai L.-F.* A Two-Step Method for Clustering Mixed Categorical and Numeric Data // *J. of Applied Sci. and Engineering.* 2010. Vol. 13. № 1. P. 11–19.  
<https://doi.org/10.6180/jase.2010.13.1.02>
- Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I., et al.* Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia // *Quat. Sci. Rev.* 2004. Vol. 23. P. 1229–1271.  
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.12.008>
- Szatmári G., Kocsis M., Makó A., Pásztor L., Bakacsi Z.* Joint Spatial Modeling of Nutrients and Their Ratio in the Sediments of Lake Balaton (Hungary): A Multivariate Geostatistical Approach // *Water.* 2022. Vol. 14. № 3. Art. 361.  
<https://doi.org/10.3390/w14030361>
- Winslow L.A., Read J.S., Hanson P.C., Stanley E.H.* Does lake size matter? Combining morphology and process modeling to examine the contribution of lake classes to population-scale processes // *Inland Waters.* 2015. Vol. 5. № 1. P. 7–14.  
<https://doi.org/10.5268/IW-5.1.740>
- Zverev I.S., Golosov S.D., Kondratiev S.A., Rasulova A.M.* Procedure for Remote Assessment of the Characteristics of Unexplored Lakes in the Continental Part of the Russian Tundra // *Doklady Earth Sci.* 2023. Vol. 511. № 2. P. 726–731.  
<https://doi.org/10.1134/s1028334X23600779>

## Methodology for Remote Assessment of Thermal Characteristics of Lakes in Permafrost Zone of European Russia

S. A. Kondratyev<sup>a</sup>, S. D. Golosov<sup>a</sup>, I. S. Zverev<sup>a</sup>, A. M. Rasulova<sup>a,\*</sup>,  
V. Yu. Krylova<sup>a</sup>, and A. V. Revunova<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

<sup>\*</sup>*e-mail: arasulova@limno.ru*

The purpose of the study is to adapt the methodology of remote assessment of hydrothermodynamic characteristics of unstudied lakes to the conditions of the European Russia's permafrost zone. The basis of the methodology is the synthesis of the results of thematic interpretation of satellite images, geostatistical assessment of their morphometric characteristics of lakes and mathematical modeling of thermodynamic processes in them. The objects of study are the permafrost zone reservoirs of three lake regions of the European Russia: the Kola segment of the Baltic Shield, the coastal plains of the Kara Sea and the western slope of the Ural Mountains, in each of which the lake basins have a similar origin. To determine the morphometric characteristics of unstudied lakes, the HydroLakes and WORDLAKE databases were used, based on remote sensing materials, literature sources and estimates of lake volumes using geostatistical models based on surface topography. The main tool for achieving this goal is a universal parameterized one-dimensional mathematical model of the hydrothermodynamics of the lake FLake, supplemented by a heat exchange block at the water-bottom boundary. The model is included in the COSMO forecasts' system, which is used to compile weather forecasts throughout the Russian Federation as a means of assessing the influence of freshwater lakes on the local climate. To specify climate input data into the model, reanalysis materials from the ERA5 family were used. Thermohydrodynamic calculations were performed for points representative of the considered lake regions within permafrost zones. It is shown that the technique adapted to the conditions of permafrost allows one to evaluate heat exchange in the system atmosphere — ice — water mass — bottom sediments, as well as the vertical distribution of temperature in water and bottom sediments.

**Keywords:** lake region, permafrost, mathematical model, heat transfer in water and bottom sediments, ice cover, reanalysis

## REFERENCES

- Assibey-Bonsu W. The basic tenets of evaluating the Mineral Resource assets of mining companies, as observed through Professor Danie Krige's pioneering work over half a century. *J.S. Afr. Inst. Min. Metall.*, 2016, vol. 116, no. 7, pp. 635–643.  
<https://doi.org/10.17159/2411-9717/2016/v116n7a5>
- Babushkina E.V., Rusakov V.S., Rusakov S.V., Shavni-na Yu.N. Area typing by geostatistical analysis based on physical and geographical factors. *Vestn. Perm. Univ.*, 2012, no. 1, pp. 33–37. (In Russ.).
- Bacher J., Wenzig K., Vogler M. *SPSS TwoStep Cluster — a First Evaluation*. Nürnberg: Arbeits-und Diskussionspapiere. Universität Erlangen-Nürnberg, Sozialwissenschaftliches Institut, Lehrstuhl für Soziologie, 2004.
- Chen Y., Wu L., Zhang G., Xu Y.J., Tan Z., Qiao S. Assessment of surface hydrological connectivity in an ungauged multi-lake system with a combined approach using geostatistics and spaceborne SAR observations. *Water*, 2020, vol. 12, no. 10, art. 2780.  
<https://doi.org/10.3390/w12102780>
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2020 god* [Report on the Peculiarities of the Climate in the Territory of the Russian Federation for 2020]. Moscow: Rosgidromet, 2021. 104 p.
- Geokriologiya SSSR. Evropeiskaya territoriya SSSR* [Geocryology of the USSR. European Territory of the USSR]. Ershova E.D., Ed. Moscow: Nedra Publ., 1988. 358 p.
- Golosov S., Kirillin G.A. Parameterized model of heat storage by lake sediments. *Environ. Model. Softw.*, 2010, vol. 25, no. 6, pp. 793–801.  
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.01.002>
- Khazaei B., Read L.K., Casali M., Sampson K.M., Yates D.N. GLOBathy, the global lakes bathymetry dataset. *Sci. Data*, 2022, vol. 9, no. 1, pp. 1–10.  
<https://doi.org/10.1038/s41597-022-01132-9>
- Ivanov P.V. Classification of the world's lakes by size and by their average depth. *Byull. Leningr. Gos. Univ.*, 1948, no. 20, pp. 29–36. (In Russ.).
- Izmailova A.V. *Ozera Rossii. Zakonomernosti raspredeleniya, resursnyi potentsial* [Lakes of Russia. Patterns of Distribution, Resource Potential]. St. Petersburg: Papirus Publ., 2018. 288 p.
- Izmailova A.V., Korneenkova N.Yu., Rasulova A.M. Identification of unique lakes using geographic information systems using the example of the Nenets autonomous okrug. *Izv. Irkut. Gos. Univ.*, 2023, vol. 43, pp. 30–45. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.43.30>
- Kirillin G., Hochschild J., Mironov D., Terzhevik A., Golosov S., Nützmänn G. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage. *Environ. Model. Softw.*, 2011, vol. 26, no. 5, pp. 683–684.  
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.12.004>
- Krylov V.E., Muravyova N.V. *Obshchaya teoriya statistiki: ucheb. posobie* [General Theory of Statistics: Textbook]. Vladimir: Izd-vo Vladimir. Gos. Univ., 2020. 243 p.
- Kochkov N.V., Ryanzhin S.V. A method of assessing lake morphometric characteristics with the use of satellite data. *Water Resour.*, 2016, vol. 43, no. 1, pp. 15–20.  
<https://doi.org/10.1134/s0097807816010103>
- Korsakova O., Tolstobrov D., Nikolaeva S., Kolka V., Tolstobrova A. Lake Imandra depression in the Late Glacial and early Holocene (Kola Peninsula, north-western Russia). *Baltica*, 2020, vol. 33, no. 2, pp. 177–190.  
<https://doi.org/10.5200/baltica.2020.2.5>
- Kravtsova V.I. Distribution of thermokarst lakes of Russia within the permafrost zone. *Vestn. Mosk. Univ. Ser. 5: Geogr.*, 2009, no. 3, pp. 33–42. (In Russ.).
- Lehner B., Döll P. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. *J. Hydrol.*, 2004, vol. 296, no. 1–4, pp. 1–22.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.028>
- Messenger M., Lehner B., Grill G., Nedeva I., Schmitt O. Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach. *Nat. Commun.*, 2016, vol. 7, no. 1, art. 13603.  
<https://doi.org/10.1038/ncomms13603>
- Mironov D.V. *Parameterization of Lakes in Numerical Weather Prediction. Description of a Lake Model. COSMO Technical Report No. 11*. Offenbach am Main: German Weather Service, 2008.
- Mironov D., Heise E., Kourzeneva E., Ritter B., Schneider N., Terzhevik A. Implementation of the lake parameterization scheme Flake into the numerical weather prediction model COSMO. *Boreal Environ. Res.*, 2010, vol. 15, pp. 218–230.
- Natsional'nyi atlas Rossii. Tom 2. Priroda. Ekologiya* [National Atlas of Russia. Vol. 2. Nature. Ecology]. Borodko A.V., Kotlyakov V.M., Eds. Moscow: PKO Kartografiya, 2007. 496 p.
- Nikolaeva S.B., Evzerov V.Ya. On geodynamics of the Kola region in the later Pleistocene and Holocene: the review and result of the studies. *Vestn. Voronezh. Gos. Univ., Ser. Geol.*, 2018, no. 1, pp. 5–14. (In Russ.).
- Obu J., Westermann S., Bartsch A., et al. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km<sup>2</sup> scale. *Earth-Sci. Rev.*, 2019, vol. 193, pp. 299–316.  
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023>
- Parkin R.A., Kanevskii M.F., Savel'eva E.A., Dem'yanov V.V. Spatiotemporal geostatistics using radioecological monitoring data as an example. *Inzh. Ekol.*, 2005, no. 1, pp. 18–32. (In Russ.).
- Rumyantsev V.A., Drabkova V.G., Izmailova A.V. *Ozera Evropeiskoi chasti Rossii* [Lakes of the European Part of Russia]. St. Petersburg: Lema Publ., 2015. 390 p.
- Rumyantsev V.A., Izmailova A.V., Makarov A.S. Status of the lake fund of the Arctic zone of the Russian Federation. *Her. Russ. Acad. Sci.*, 2021, vol. 91, no. 1, pp. 26–36.  
<https://doi.org/10.1134/s101933162101007X>



- Sarah S., Jeelani G., Ahmed S. Assessing variability of water quality in a groundwater-fed perennial lake of Kashmir Himalayas using linear geostatistics. *J. Earth Syst. Sci.*, 2011, vol. 120, pp. 399–411.  
<https://doi.org/10.1007/s12040-011-0081-6>
- Shih M.-Yi, Jheng J.-W., Lai L.-F. A Two-Step method for clustering mixed categorical and numeric data. *J. Appl. Eng. Sci.*, 2010, vol. 13, no. 1, pp. 11–19.  
<https://doi.org/10.6180/jase.2010.13.1.02>
- Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I., et al. Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia. *Quat. Sci. Rev.*, 2004, vol. 23, pp. 1229–1271.  
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.12.008>
- Szatmári G., Kocsis M., Makó A., Pásztor L., Bakacsi Z. Joint spatial modeling of nutrients and their ratio in the sediments of Lake Balaton (Hungary): A multivariate geostatistical approach. *Water*, 2022, vol. 14, no. 3, art. 361.  
<https://doi.org/10.3390/w14030361>
- Vechnaya merzlota Kol'skogo poluostova* [Permafrost of the Kola Peninsula]. Moscow: Nauka Publ., 1953. 180 p.
- Winslow L.A., Read J.S., Hanson P.C., Stanley E.H. Does lake size matter? Combining morphology and process modeling to examine the contribution of lake classes to population-scale processes. *Inland Waters*, 2015, vol. 5, no. 1, pp. 7–14.  
<https://doi.org/10.5268/IW-5.1.740>
- Zverev I.S., Golosov S.D., Kondrat'ev S. A., Rasulova A.M. Procedure for remote assessment of the characteristics of unexplored lakes in the continental part of the Russian tundra. *Dokl. Earth Sci.*, 2023, vol. 511, no. 2, pp. 726–731.  
<https://doi.org/10.1134/s1028334X23600779>