

УДК 504.455; 519.688; 528.88

РЕТРОСПЕКТИВНАЯ И ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА АБИОТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕИЗУЧЕННЫХ ОЗЕР ЗОНЫ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ АЗИАТСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С. А. Кондратьев, С. Д. Голосов, И. С. Зверев, А. М. Расулова*

*Институт озероведения РАН – СПб ФИЦ РАН (ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105), *arasulova@limno.ru*

Целью исследования является усовершенствование методики дистанционной оценки термогидродинамических характеристик неизученных и малоизученных озер северных территорий нашей страны применительно к задаче ретроспективных и прогностических расчетов с использованием методов математического моделирования. Объектами изучения являются озерные регионы азиатской части России, расположенные в пределах зоны многолетней мерзлоты. Концептуально методика дистанционной оценки сводится к следующим шагам. На первом этапе с помощью камеральных методов определяются географические координаты озера и его площадь. Далее строятся геостатистические зависимости средней глубины водоема от площади акватории, по которым рассчитывается средняя глубина. Данные метеорологического реанализа в совокупности с глубиной водоема подаются на вход одномерной модели FLake и являются основой ретроспективной оценки характеристик озера. Оценка последствий климатических изменений к концу 21 века происходит на основе сценариев выбросов в атмосферу парниковых газов SSP. Ретроспективные и прогностические расчеты гидротермодинамических характеристик неизученных водных объектов на основе модели FLake выполняются без дополнительной ее верификации, так как модель, используемая в практике прогноза погоды Росгидромета, априори применима для территории России. Выполнены имитационные гидротермодинамические расчеты для репрезентативных точек рассмотренных озерных регионов в пределах зоны многолетней мерзлоты. Показано, что предложенная методика оценки абиотических характеристик неизученных малых и средних озер позволяет не только рассчитывать ретроспективную динамику термодинамических характеристик водной толщи и донных отложений, но и давать оценку их возможных изменений в будущем при реализации различных сценариев изменения климата в азиатской части России.

Ключевые слова: озерный регион; гидротермодинамические характеристики; математическая модель; климат; реанализ; прогноз

Для цитирования: Кондратьев С. А., Голосов С. Д., Зверев И. С., Расулова А. М. Ретроспективная и прогностическая оценка абиотических характеристик неизученных озер зоны многолетней мерзлоты азиатской части России с использованием

S. A. Kondratyev, S. D. Golosov, I. S. Zverev, A. M. Rasulova*. RETROSPECTIVE AND PROGNOSTIC ASSESSMENT OF ABIOTIC CHARACTERISTICS OF UNSTUDIED LAKES IN THE PERMAFROST ZONE OF THE ASIAN PART OF RUSSIA USING MATHEMATICAL MODELING

*Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences (9 Sevastyanova St., 196105 St. Petersburg, Russia), *arasulova@limno.ru*

The aim of the study is to improve the methodology of remote assessment of hydrothermodynamic characteristics of unstudied and poorly studied lakes in northern territories of our country as applied to the task of retrospective and prognostic calculations using mathematical modeling methods. The objects of study are lake regions in the permafrost zone in the Asian part of Russia. Conceptually, the remote sensing methodology is reduced to the following steps. At the first stage, the geographical coordinates of the lake and its area are determined using desktop methods. Further, geostatistical dependences of the average depth of the lake on the water area are plotted, from which the average depth is calculated. The meteorological reanalysis data together with the lake depth are fed into the one-dimensional FLake model and form the basis for retrospective assessment of the lake characteristics. The effects of climate change by the end of the 21st century are estimated based on SSP greenhouse gas emission scenarios. Retrospective and prognostic calculations of hydrothermodynamic characteristics of unstudied water bodies based on the FLake model are performed without its additional verification, since the model used in the practice of weather forecasting by Roshydromet is a priori applicable for the territory of Russia. Hydrothermodynamic simulations were performed for representative points in the lake regions within the permafrost zone. It is shown that the proposed methodology for assessing the abiotic characteristics of unstudied small and medium-sized lakes allows not only to calculate the retrospective dynamics of thermodynamic characteristics of the water column and bottom sediments, but also to assess their possible changes in the future under different climate change scenarios in the Asian part of Russia.

Keywords: lake region; hydrothermodynamic characteristics; mathematical model; climate; reanalysis; forecast

For citation: Kondratyev S. A., Golosov S. D., Zverev I. S., Rasulova A. M. Retrospective and prognostic assessment of abiotic characteristics of unstudied lakes in the permafrost zone of the Asian part of Russia using mathematical modeling. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 2. P. 19–32. doi: 10.17076/lim2062

Funding. The work was supported by the Russian Science Foundation project 24-27-00067.

Введение

На современных спутниковых снимках в пределах Российской Федерации дешифрируется ~ 3,8 млн естественных водоемов. Только в районах распространения многолетнемерзлых пород (ММП) их 3,3 млн (~ 88 % от общего числа по стране) [Измайлова, 2016]. Водные объекты этих территорий относятся к категории малоизученных из-за их труднодоступности и невозможности выполнения регулярных контактных измерений морфометрических,

термогидродинамических и других характеристик. Сказанное негативно влияет на планирование хозяйственной деятельности в северных регионах, а также на научную обоснованность прогнозов возможных изменений термических характеристик озер и их донных отложений в условиях климатических изменений. Труднодоступность озер в зоне ММП делает традиционные методы исследования малоэффективными. Современные спутниковые технологии и методы математического моделирования становятся ключевыми инструментами для

изучения этих объектов [Косиков и др., 2019; Полищук и др., 2024]. Отсутствие инструментов и методик количественной оценки морфометрических параметров неисследованных озер многолетней мерзлоты, в частности, затрудняет точную оценку их термического режима, который напрямую влияет на текущее состояние их экосистем.

В Институте озероведения РАН разработана методика оценки абиотических характеристик неизученных озер северных территорий нашей страны по данным спутниковой съемки с использованием геостатистических методов анализа морфометрических параметров озер и результатов математического моделирования термогидродинамики (ТГД) водных объектов [Zverev et al., 2023]. При этом не требуются контактные измерения, что крайне важно для труднодоступных и малоизученных северных территорий нашей страны. Указанная методика использована для оценки особенностей и закономерностей формирования ТГД-характеристик озер, расположенных в зоне многолетнемерзлых пород (ММП) на европейской территории России [Зверев и др., 2023]. Целью настоящего исследования является адаптация методики применительно к задаче ретроспективных и

прогностических расчетов абиотических параметров неизученных озер азиатской части зоны многолетней мерзлоты России с использованием методов математического моделирования.

Объектами исследования являются малые и средние (площадью до 100 км²) континентальные озера, находящиеся в зоне залегания многолетнемерзлых пород различной мощности азиатской части России. В соответствии с классификацией, предложенной в [Румянцев и др., 2017; Измайлова, 2018], эту зону практически полностью покрывают следующие двенадцать озерных регионов: 1 – Прибрежные равнины Карского моря, 2 – Прибрежные равнины моря Лаптевых, 3 – Прибрежные равнины Восточно-Сибирского моря, 4 – Среднесибирское плоскогорье, 5 – Аккумулятивные, аккумулятивно-денудационные и озерно-аллювиальные равнины таежной зоны, 6 – Восточный склон Уральской горной страны, 7 – Алтайско-Саянская горная страна, 8 – Байкальская горная страна, 9 – Горные области Северо-Восточной Сибири и севера Дальнего Востока, 10 – Плато Путорана, 11 – Горы Бырранга и Северной Земли, 12 – Вулканические области Дальнего Востока. Приведенная выше нумерация озерных регионов использована на рис. 1 и далее.

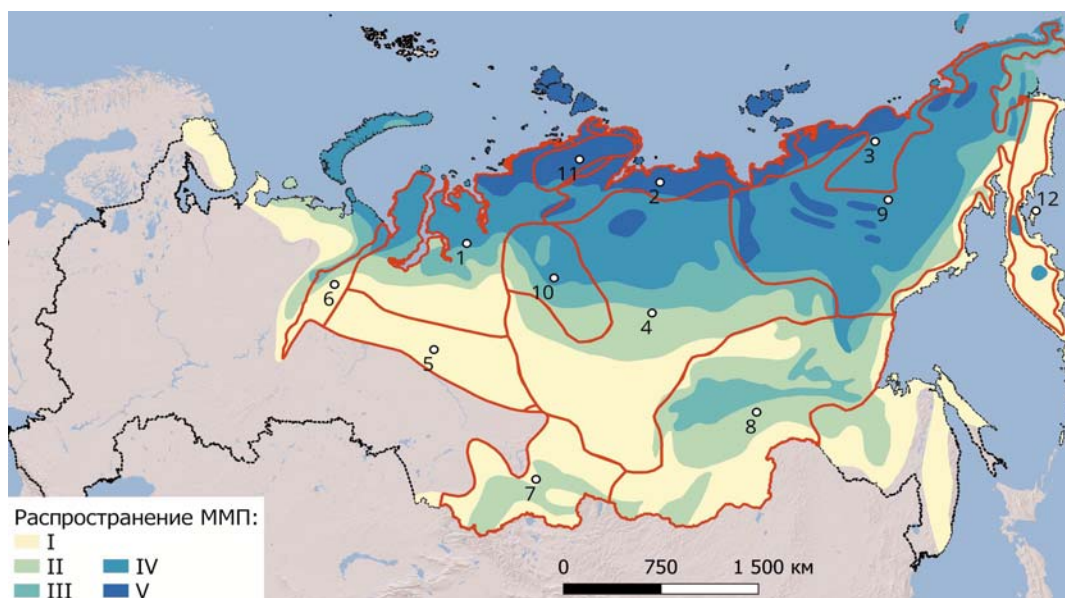


Рис. 1. Озерные регионы азиатской части России, находящиеся в зоне распространения многолетнемерзлых пород (ММП):

I – зона редкоостровного, островного и массивно-островного распространения ММП мощностью мерзлотной толщи 0–100 м; зона сплошного распространения ММП: II – мощностью 50–300 м, III – мощностью 100–400 м, IV – мощностью 200–600 м, V – мощностью 400–900 м и ниже. Красная линия – границы озерных регионов [Измайлова, 2018]; черная линия – границы РФ; ○ – центры соответствующих озерных регионов

Fig. 1. Lake regions of the Asian part of Russia located in the permafrost zone:

I – zone of sparse-island, island and massive-island distribution of permafrost thickness 0–100 m, zone of continuous distribution of permafrost: II – thickness 50–300 m, III – thickness 100–400 m, IV – thickness 200–600 m, V – thickness 400–900 m and below. Red line – borders of lake regions [Izmailova, 2018]; black line – borders of the Russian Federation; ○ – centroids of the corresponding lake regions

Границы распространения ММП 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].

В основу районирования на озерные регионы положен генетический принцип, то есть единство геологической истории происхождения большинства озерных котловин в пределах определенной территории. Генетический принцип позволяет учитывать сложное сочетание зональных и азональных факторов и устанавливает временную точку отсчета эволюции озер путем лимногенеза в пределах выделенной территории при энергетическом потенциале тех широт, в пределах которых этот регион располагается [Реки..., 2012; Румянцев и др., 2017; Измайлова, 2018]. При выделении региона учитывается также его озерность. Единое происхождение котловин позволяет выявить общие типологические показатели озер и выделить диапазон их изменчивости, определяемый особенностями внутренней структуры озерного региона. В пределах озерного региона наблюдается общность по таким основным компонентам природной среды, как геология и климат. Также здесь учтены особенности геологического развития территории.

Подробное описание озерных регионов, представленных на рис. 1, содержится в работах [Румянцев и др., 2017; Измайлова, 2018].

Методы и модели

Общая схема ретроспективной и прогностической оценки характеристик неизученных озер с использованием дистанционных методов и математического моделирования представлена на рис. 2. Следует отметить, что в зависимости от целей и задач того или иного исследования блоки схемы могут быть заменены на аналогичные или полностью отсутствовать.

Основные этапы выполнения дистанционной оценки параметров водоема сводятся к следующему:

- с использованием средств дистанционного зондирования Земли дешифрируется интересующий водный объект, определяются его географические координаты и площадь водной поверхности;
- для определения средней глубины исследуемого водоема строятся геостатистические взаимосвязи на основе общедоступных данных (например, баз данных WORDLAKE и HydroLAKES, а также других литературных источников) между морфометрическими



Рис. 2. Схема ретроспективной и прогностической оценок абиотических характеристик неизученных озер с использованием методов дистанционного зондирования и математического моделирования

Fig. 2. Scheme of retrospective and prognostic assessments of abiotic characteristics of unstudied lakes using remote sensing and mathematical modelling

характеристиками однородной группы водных объектов, прежде всего $H = f(A)$, где H – средняя глубина водоема, A – площадь его акватории;

– по географическим координатам водного объекта из баз данных метеорологического реанализа (например, ERA 5 или NCEP/NCAR) или на основе метеонаблюдений извлекается ретроспективная метеоинформация требуемого разрешения;

– метеопараметры и рассчитанная средняя глубина водоема подаются на вход модели FLake с целью получения ретроспективной оценки характеристик водного объекта;

– для оценки последствий возможных климатических изменений к концу 21 века могут быть использованы сценарии выбросов в атмосферу парниковых газов SSP (Shared Socio-economic Pathway¹). Прогностические сценарии изменения метеорологических характеристик для изучаемой территории основываются на результатах пересчета сценариев выбросов парниковых газов SSP в метеорологические параметры региона исследований по моделям общей циркуляции атмосферы и океана. Метеопараметры, рассчитанные по моделям общей циркуляции атмосферы и океана в совокупности с геостатистической оценкой глубины водоема, позволяют получить прогностические оценки характеристик водного объекта.

Построенная таким образом схема оценки и прогноза изменений характеристик разнотипных озер различного генетического происхождения может применяться для малых и средних неизученных и малоизученных водоемов России, включая и водоемы зоны многолетней мерзлоты. При условии дополнения модели FLake соответствующими программными модулями по приведенной выше схеме могут быть оценены и химико-биологические характеристики водоемов, такие как кислородный режим, биомасса и первичная продукция водорослей, прозрачность воды и др.

Одним из основных элементов предлагаемой методики оценки абиотических характеристик неизученных озер зоны многолетней мерзлоты является гидрофизическая модель озера FLake², разработанная совместными усилиями сотрудников Института озероведения РАН, Института водных проблем Севера КарНЦ РАН, Института водной экологии

и внутреннего рыбоводства Германии (IGB) и Службы погоды Германии (DWD) [Golosov, Kirillin, 2010; Mironov et al., 2010; Kirillin et al., 2011]. FLake представляет собой универсальную параметризованную одномерную математическую модель ТГД-процессов в озере, в которой реализованы результаты, полученные в ходе многолетних натурных и лабораторных исследований, выполненных на Лимнологической станции Института озероведения РАН, а также 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 COSMO³, используемая и в нашей 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 водоемах озерных регионов, рассматриваемых в настоящей работе без дополнительной верификации и апробации. На рис. 3 схематично представлено вертикальное распределение температуры в системе «снег – лед – водная масса – донные отложения», временная динамика которого рассчитывается в модели.

В соответствии с рис. 3 озеро в модели имеет в период открытой воды (Лето) трехслойную структуру. Сверху расположен верхний перемешанный слой толщиной h , в котором из-за постоянно присутствующего ветрового/конвективного перемешивания температура T_s постоянна по глубине. Ниже перемешанного слоя находится устойчиво стратифицированная по плотности водная масса толщиной $(D-h)$, в которой температура воды уменьшается до значения T_D – температуры воды на границе раздела вода-дно. Устойчивая плотностная стратификация препятствует проникновению перемешивания, а вместе с ним и тепла в придонную область.

¹ Climate Data Store. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu> (дата обращения: 15.03.2024).

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

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

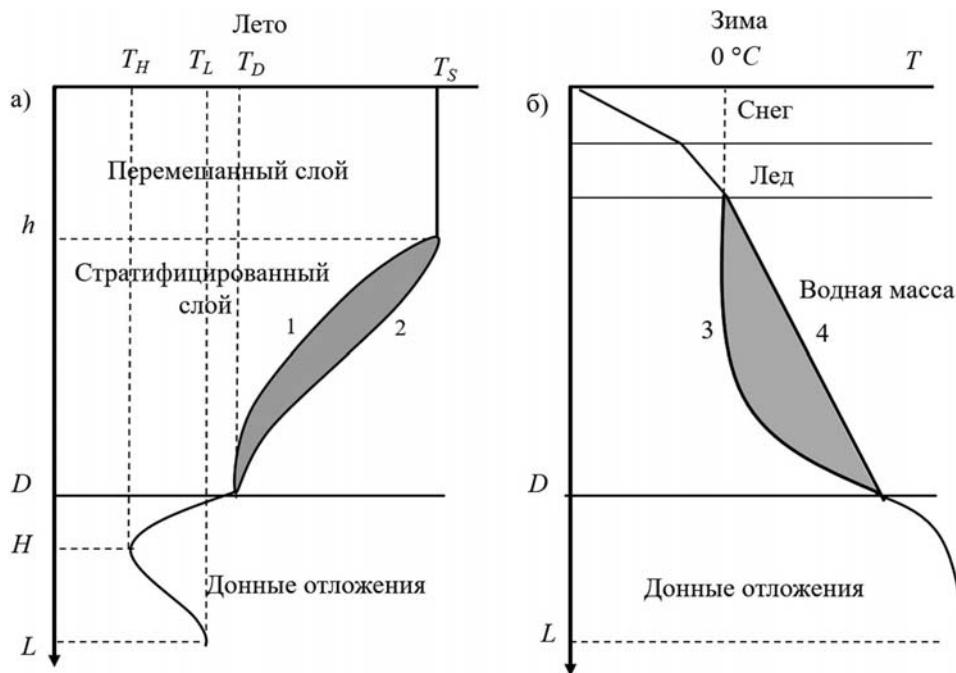


Рис. 3. Схема вертикального профиля температуры (T) в системе «снег – лед – водная масса – донные отложения», реализованная в модели FLake: обострение (1) и сглаживание (2) температурного градиента летом, профиль температуры в начале ледостава (3) и в период подледного прогрева (4)

Fig. 3. Scheme of the vertical temperature profile (T) in the system 'snow – ice – water mass – bottom sediments' realised in the FLake model: sharpening (1) and smoothing (2) of the temperature gradient in summer, the temperature profile at the beginning of ice break-up (3) and during the period of sub-ice warming (4)

В те моменты, когда перемешивание все-таки достигает дна – под воздействием сильного ветра либо плотностной весенней/осенней конвекции – температура по всей глубине озера выравнивается и становится равной ее среднему значению.

Профили температуры в стратифицированной области водной массы различаются в зависимости от ветрового перемешивания и поведения верхнего перемешанного слоя. При усилении перемешивания и соответствующего заглубления перемешанного слоя в стратифицированную водную массу на нижней границе перемешанного слоя происходит обострение температурного градиента (линия 1 на рис. 3). В ситуации, когда воздействие ветра снижается, происходит вырождение верхнего перемешанного слоя со сглаживанием градиента температуры на его нижней границе (линия 2 на рис. 3). В модели предусмотрена процедура плавной смены типа профиля в области, ограниченной линиями 1 и 2, что предотвращает резкие скачки потока тепла на нижней границе перемешанного слоя и соответствующие скачки его температуры.

В донных отложениях (ДО) рассматривается верхний теплоактивный слой толщиной $(L-D)$. В пределах этого слоя профиль температуры испытывает сезонные колебания, которые затухают на глубине нижней границы слоя L . Температура на этой глубине T_L остается постоянной в течение всего года. Значения L и T_L являются эмпирическими параметрами модели и определяются по данным натурных наблюдений. В периоды весенне-летнего прогрева и осеннего охлаждения профиль температуры в ДО не является монотонным и имеет экстремум – минимальное/максимальное значение температуры в пределах теплоактивного слоя. Глубина экстремума H в ДО и температура T_H на этой глубине являются переменными модели и рассчитываются из соответствующих уравнений [Golosov, Kirillin, 2010].

В течение ледостава (Зима) озеро в модели имеет четырехслойную структуру – снежный покров, лед, водную массу и донные отложения. Нарастание и таяние льда, а также накопление и таяние на нем снега рассчитывается в соответствующих модулях модели.

Между нижней границей льда и донными отложениями расположена устойчиво стратифицированная по плотности водная масса, имеющая из-за особенностей уравнения состояния пресной воды обратную температурную стратификацию, т. е. температура воды растёт от границы раздела вода-лед, где поддерживается её нулевое значение в течение всего ледостава, до температуры T_D на дне. В ДО к началу ледостава, как правило, формируется монотонное распределение температуры, которая увеличивается от величины T_D на границе раздела вода-дно до T_L – температуры на нижней границе теплоактивного слоя.

Термический режим озера в зимний период имеет ряд особенностей. Дело в том, что осенне-зимнее охлаждение в озерах происходит в основном через границу раздела вода-атмосфера, что приводит к ускоренной потере тепла водной массой по сравнению с ДО. В результате к моменту образования льда донные отложения становятся теплее водной массы, и начинается так называемый «подледный прогрев» озера, приводящий к временной изменчивости вида профиля температуры в водной массе. Профиль температуры в начале ледостава имеет вид формы 3 (рис. 3). По мере подледного прогрева профиль постепенно трансформируется к виду, представленному линией 4, т. е. практически к линейному распределению, что свидетельствует об установлении в озере в течение ледостава квазистационарного вертикального переноса тепла. В модели предусмотрена процедура расчета трансформации профиля температуры формы 3 (рис. 3) к линейному распределению.

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.

Несмотря на обширные возможности модели и её универсальность, водные объекты, к которым применяется одномерная модель FLake, должны удовлетворять следующим условиям:

– протяженность не должна быть настолько велика, чтобы породить значительные климатические различия между отдельными участками акватории, и настолько мала, чтобы вторичная

ветровая циркуляция играла очень существенную роль;

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

– адвективные процессы не должны вносить существенного вклада в турбулентное перемешивание.

На основе изложенного значение максимальной площади изучаемого озера определено в 100 км^2 .

При наличии необходимой исходной информации модель рассчитывает следующие характеристики выбранного озера:

– теплоперенос между атмосферой, льдом, водой и донными отложениями;

– вертикальный профиль температуры воды, температуру у поверхности озера и у дна;

– профиль температуры в донных отложениях;

– дату образования ледового покрова, его продолжительность и толщину;

– слой сезонного оттаивания донных отложений в озерах зоны вечной мерзлоты.

В качестве примеров использования модели FLake для оценки параметров водной массы и донных отложений озера зоны многолетней мерзлоты в нашей стране можно назвать результаты работ [Zdorovenov et al., 2020; Zverev et al., 2023; Kondratyev et al., 2024].

В настоящем исследовании для озерных регионов зоны многолетней мерзлоты, занимающих большую часть азиатской части нашей страны (рис. 1), использованы геостатистические зависимости глубины озера (H) от его площади (A), полученные в результате статистической обработки баз данных WORLDLAKE [Рянжин, Ульянова, 2000] и HydroLAKES [Messenger et al., 2016]. В таблице приведены зависимости $H = f(A)$ для различных озерных регионов, а также географические координаты их центроидов. Каждый центроид (центр тяжести) представляет собой барицентр слоя озерного региона, его координаты – это средние значения координат всех узлов полигона, которые определены с использованием программы QGIS.

Для задания атмосферного воздействия («форсинга») при моделировании ТГД-процессов в озерах в настоящей работе использовались данные метеорологического реанализа семейства ERA5¹, представляющего собой ряды восстановленных значений метеорологических параметров для всего земного шара, которые обновляются ежедневно с задержкой около 5 дней.

¹ ERA5. URL: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5> (дата обращения: 15.03.2024).

Данные доступны с 1940 года по настоящее время. ERA5 предоставляет почасовые оценки для большого числа параметров атмосферы, океанических волн и поверхности земли. Временной шаг между сроками «наблюдений» составляет 6 часов, пространственное разрешение реанализа – $0,25^\circ$ по широте и долготе. Выборка необходимых для расчетов данных производится по координатам расчетной точки. Для облегчения работы многих климатических приложений рассчитываются также и среднемесячные значения гидрометеорологических параметров. В настоящей работе данные реанализа использовались для расчета ТГД-характеристик озер для интервала времени 1940–2015 гг., после чего в качестве входной гидрометеорологической информации в модель FLake служили прогностические оценки климатических воздействий.

Для оценки последствий возможных климатических изменений и их влияния на характеристики водоемов использованы так называемые SSP сценарии эволюции антропогенных выбросов парниковых газов в атмосферу [IPCC..., 2021; Семенов, Гладильщикова, 2022]. Принималось, что до конца 21 века выбросы парниковых газов будут осуществляться по сценариям SSP-2.6 или SSP-8.5, т. е. по лучшему или худшему с точки зрения воздействия на окружающую среду. Сценарий SSP-2.6 требует, чтобы выбросы диоксида углерода (CO_2) начали неуклонно снижаться и достигли нуля к 2100 г. Выбросы метана (CH_4) должны уменьшиться наполовину, при этом уровень выбросов диоксида серы (SO_2) составит примерно 10 % от уровня 1980–1990 годов. В сценарии SSP-8.5 выбросы продолжают расти в течение всего 21 века теми

же темпами, что и сейчас. Цифры в аббревиатурах сценариев (2.6 и 8.5) указывают на дополнительное количество энергии (Вт/м^2), которое будет аккумулировано атмосферой в результате выбросов парниковых газов. Значения метеорологических параметров (коротковолновая радиация, температура воздуха и давление водяного пара на высоте 2 м, скорость ветра на высоте 10 м, облачность, осадки), соответствующих реализации сценариев социально-экономической деятельности человека (SSP) в изучаемом регионе на период до 2100 года, рассчитаны с использованием климатической модели CanESM5. Модель входит в число ансамбля из 37 глобальных климатических моделей, принявших участие в 6-й фазе международного проекта сравнения объединенных моделей CMIP6¹. Выбор именно этой модели объясняется тем, что она позволяет получать метеорологические характеристики необходимого разрешения, которые являются входными параметрами в модель FLake. Расчеты с использованием климатических сценариев изменения гидрометеорологических характеристик выполнялись для временного интервала с 2016 по 2100 г.

Результаты и обсуждение

Расчеты ТГД-характеристик озер выполнялись для точек с координатами центроидов озерных регионов и средними значениями глубин озер рассматриваемого региона (рис. 1, табл.)

¹ CMIP6 climate projections. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/projections-cmip6?tab=overview> (дата обращения: 15.03.2024).

Геостатистические зависимости средней глубины озера от его площади $H = f(A)$, медианные значения средней глубины озера H_{cp} и географические координаты центроидов для озерных регионов

Geostatistical dependences of mean lake depth on its area $H = f(A)$, median values of mean lake depth H_{sr} and geographical coordinates of centroids for lake regions

№ региона Region no.	Географические координаты центроидов Geographical coordinates of centroids	$H = f(A)$	$H_{cp}, \text{ м}$
1	N68.828103°, E80.882440°	$H = 4,1285 A^{0,1059}$	3,7
2	N69.314860°, E153.976037°	$H = 5,2117 A^{0,1736}$	4,6
3	N72.619205°, E115.653177°	$H = 4,4222 A^{0,112}$	3,9
4	N63.974322°, E109.940358°	$H = 5,1943 A^{0,1701}$	4,3
5	N61.34931°, E78.80041°	$H = 3,5516 A^{0,1037}$	3,2
6	N63.98283°, E62.53119°	$H = 5,2418 A^{0,1545}$	4,4
7	N53.15034°, E93.28403°	$H = 5,9311 A^{0,1355}$	5,2
8	N55.905941°, E120.486119°	$H = 4,0130 A^{0,1209}$	3,5
9	N65.58758°, E149.87252°	$H = 6,1950 A^{0,1376}$	5,0
10	N66.887258°, E95.509105°	$H = 8,0389 A^{0,173}$	6,7
11	N74.905214°, E100.811096°	$H = 8,9658 A^{0,1751}$	7,9
12	N59.064097°, E165.076459°	$H = 4,6982 A^{0,0667}$	4,2

за период 1940–2100 гг. Ретроспективная динамика среднегодовой температуры водной массы и максимальной толщины ледового покрова за период 1940–2015 гг., представленная на рис. 4 для всех озерных регионов, рассчитывалась с использованием информации гидрометеорологического реанализа. Далее с 2016 до 2100 г. в качестве входной информации служили данные климатических прогнозов (SSP-2.6 и SSP-8.5). Для проведения последующих имитационных расчетов выполнялась стыковка гидрометеорологической информации реанализа и климатических прогнозов. Адаптации сценариев SSP к ретроспективным данным реанализа проводились с использованием метода корректировки значений параметров реанализа (1940–2015 гг.) и прогностических SSP сценариев (2016–2100 гг.) [Кондратьев, Бовыкин, 2003].

Нетрудно видеть, что согласно выполненным расчетам экстремальные условия прогрева водной массы водоемов характерны для озерных регионов 7 (Алтайско-Саянская горная страна) с максимальным прогревом озер и 11 (Горы Бырранга и Северной Земли) с минимальным прогревом. Среднегодовая температура воды в озерах этих регионов в 1940 г. составила соответственно 8,25 и 0,63 °С, а в 2015 г. – 8,76 и 0,89 °С. При этом к 2100 г. среднегодовой прогрев озер региона 7 может достичь значений 11,40 °С при реализации климатического сценария SSP 8.5 (возрастет на 38 % по отношению к 1940 г.). Согласно этому сценарию, рост эмиссии парниковых газов в атмосферу Земли продолжается теми же темпами, что и сейчас. В регионе 11 увеличение среднегодовой температуры воды может составить 625 % по отношению к 1940 г. (рис. 4).

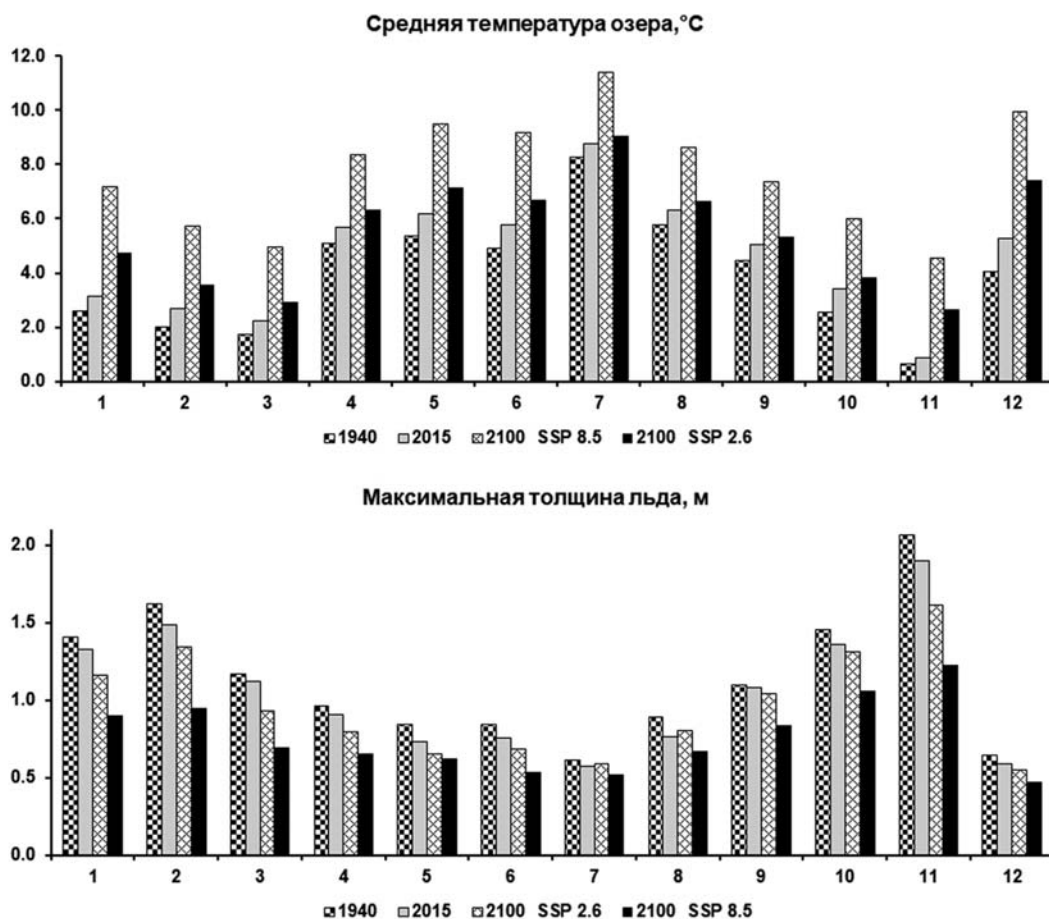


Рис. 4. Результаты расчета среднегодовых значений температуры воды и максимальной толщины льда в 1940, 2015 и 2100 годах (по климатическим сценариям SSP 2.6 и SSP 8.5) для 12 гипотетических озер, расположенных в центроидах изучаемых озерных регионов

Fig. 4. Results of calculation of mean annual values of water temperature and maximum ice thickness in 1940, 2015 and 2100 (under SSP 2.6 and SSP 8.5 climate scenarios) for 12 hypothetical lakes located in the centroids of the studied lake regions

Прямо противоположная ситуация имеет место при расчетах толщины ледяного покрова. В регионе 7 снижение значения максимальной толщины льда при реализации наиболее неблагоприятного сценария SSP 8.5 составит 0,09 м (-14,8 %) по отношению к 1940 году. В регионе 11 указанное снижение может достигнуть 0,83 м (-40,3 %). Представленные на рис. 4 результаты моделирования позволяют предположить, что ТГД-характеристики водных объектов в озерных регионах с континентальным климатом (4–10) менее восприимчивы к возможным климатическим воздействиям по сравнению с приморскими регионами (1–3, 11, 12). Ситуация с прогревом и толщиной льда озер в рассматриваемых озерных регионах зоны многолетней мерзлоты полностью соответствует современным представлениям о потеплении в северных районах нашей страны. Толщина льда уменьшается во всех водоемах, причем образование, нарастание и таяние льда в озерах является главным образом результатом взаимодействия водной массы с атмосферой.

Более детально рассчитанная ретроспективная и прогностическая динамика ТГД-характеристик (среднегодовой температуры водной массы и максимальной толщины ледового покрова) для гипотетических озер, расположенных в центроидах озерных регионов 7 и 11 с экстремальной реакцией на климатические изменения, представлена на рис. 5.

Как отмечено выше, согласно проведенным расчетам, среднегодовые ТГД-характеристики озер региона 7 (Алтайско-Саянская горная страна) практически не изменились за период с 1940 года по настоящее время и слабо реагируют на климатические изменения по экологически благополучному сценарию SSP 2.6. В случае если выбросы парниковых газов продолжают расти в 21 веке теми же темпами, что и сейчас (сценарий SSP 8.5), прогрев водной массы может увеличиться на 37 % по сравнению с ситуацией 1940 г. Озерный регион 11 (Горы Бырранга и Северной Земли), подверженный более сильному воздействию океана, демонстрирует существенную ретроспективную

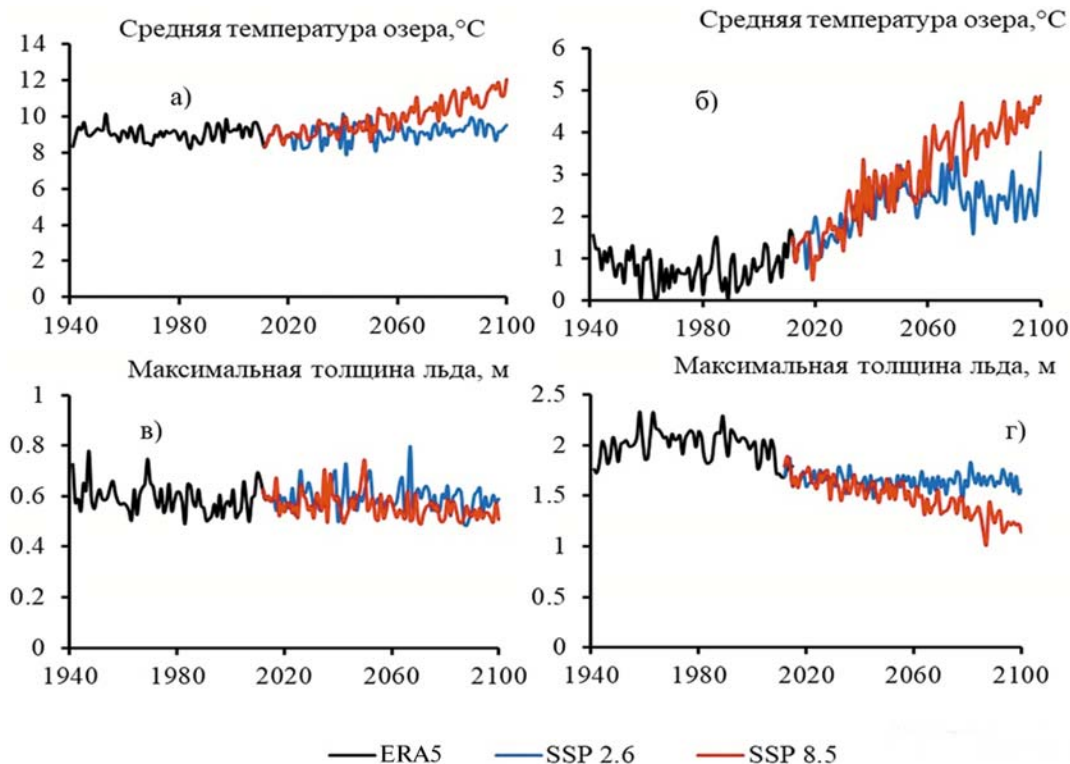


Рис. 5. Ретроспективная (ERA5) и прогностическая (SSP 2.6 и SSP 8.5) оценки динамики среднегодовых ТГД-характеристик (среднегодовая температура водной массы и средняя толщина ледового покрова) для озер, расположенных в центроидах областей 7 (а, в) и 11 (б, г), за период 1940–2100 гг.

Fig. 5. Retrospective (ERA5), and prognostic (SSP 2.6 and SSP 8.5) estimates of the dynamics of mean annual THD characteristics (mean annual water mass temperature and mean ice cover thickness) for lakes located in the centroids of regions 7 (a, в) and 11 (б, г) for the period 1940–2100

нестабильность ТГД-характеристик, проявляющаяся в том, что средняя температура воды в 1960–1990 гг. иногда снижалась до 0 °С. Последующее ретроспективное возрастание температуры воды плавно переходит в прогностические оценки по обоим сценариям и продолжается до середины 21 века. После этого результаты расчета по экологически благоприятному сценарию SSP 2.6 стабилизируются около значения среднегодовой температуры воды 2,7 °С и максимальной толщины льда 1,6 м. Реализация неблагоприятного сценария SSP 8.5 приведет к увеличению среднегодовой температуры до 4,6 °С и уменьшению

максимальной толщины ледового покрова до 1,2 м к концу столетия.

Пример ретроспективной и прогностической оценки внутригодовой динамики ТГД-характеристик на примере потока тепла через дно и толщины слоя сезонного оттаивания (ССО) для тех же точек областей 7 и 11 для условий 2015 и 2100 гг. представлен на рис. 6.

В связи с очевидным влиянием возможного потепления климата на динамику прогрева озер и толщину ледового покрова в них возникает вопрос о воздействии такого потепления на многолетнемерзлые породы, которые являются составной частью донных отложений.

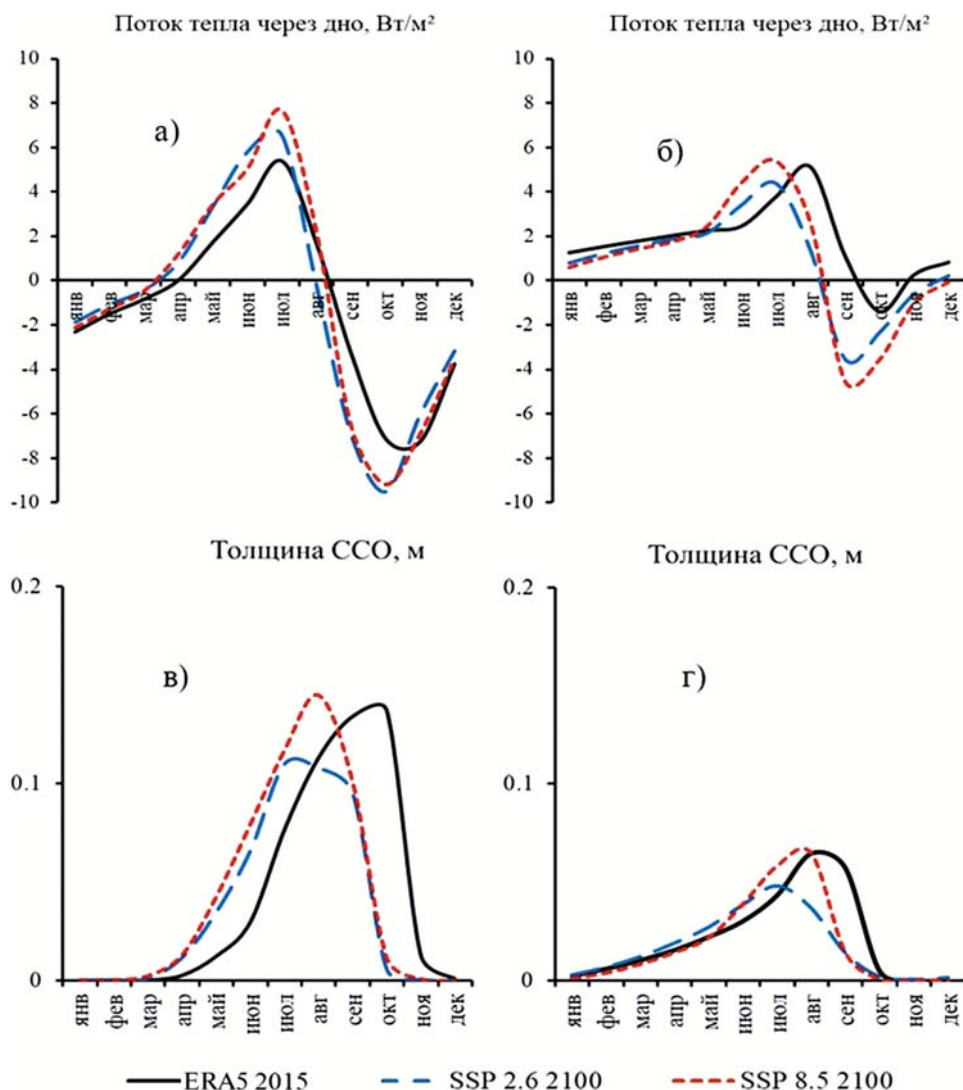


Рис. 6. Ретроспективная (ERA5 2015 г.) и прогностическая (SSP 2.6 2100 г. и SSP 8.5 2100 г.) оценки внутригодовой динамики потока тепла через дно и толщины ССО для озер, расположенных в центроидах областей 7 (а, в) и 11 (б, г), в 2015 и 2100 гг.
 Fig. 6. Retrospective (ERA5 2015), and prognostic (SSP 2.6 2100 and SSP 8.5 2100) estimates of intra-annual dynamics of heat flux through the bottom and SSO thickness for lakes located at the centroids of regions 7 (а, в) and 11 (б, г) in 2015 and 2100

Дело в том, что водная масса любого водоема, включая озера, является естественным теплоизолятором между атмосферой и донными отложениями. К тому же такой теплоизолятор обладает еще и аномально высокой теплоемкостью. Потепление атмосферы приведет к некоторому увеличению в первую очередь поверхностной температуры в озерах, что, скорее всего, увеличит вертикальную плотностную стратификацию в них, тем самым усиливая изоляцию придонных слоев от проникновения в них атмосферного тепла. Абсолютные значения потока тепла через границу раздела вода-дно крайне невелики – менее 8 Вт/м^2 (рис. 6), к тому же в течение года он может быть разнонаправленным, т. е. суммарный поток тепла, направленный в ДО, будет еще меньше. Тем не менее этого оказывается достаточно для образования ССО донных отложений. По данным моделирования, толщина ССО в озерах региона 7 может достигать 0,14 м, для озера региона 11 – 0,05 м. При этом потепление климата приведет к смещению максимума оттаивания ДО в более ранний период.

Разумно предположить, что ситуация с изменением климата в результате деятельности человека будет протекать по некоему промежуточному сценарию. Кроме того, важно помнить, что теоретические аспекты воздействия изменений климата на окружающую среду, и водные системы в частности, находятся в стадии интенсивного развития. Весьма вероятно, что в скором времени будут разработаны новые сценарии эмиссии парниковых газов и климатические модели. Поэтому нужно быть готовым к уточнению прогностических оценок воздействия будущих изменений климата на водные системы.

Ретроспективные и прогностические расчеты гидротермодинамических характеристик неизученных водных объектов на основе модели FLake могут выполняться без дополнительной ее верификации, так как модель априори применима для использования на территории России. Для расширения возможностей предложенной методики в область решения задач оценки химико-биологических параметров озерной экосистемы требуется привлечение соответствующей экосистемной модели. Примером такой модели может служить FLakeEco [Тержевик и др., 2010], позволяющая выполнять расчеты содержания кислорода в воде, биомассы и первичной продукции фитопланктона. Однако использование такой модели требует проведения верификации по данным натурных наблюдений с целью определения ее химико-биологических параметров, что затруднительно в отдаленных северных регионах.

Заключение

Представленные результаты имитационного и прогностического моделирования подтверждают широкий спектр возможностей модели FLake при решении задач количественной оценки и прогноза изменений ТГД-процессов в малых и средних по площади озерах, расположенных в различных физико-географических и климатических условиях при недостатке или отсутствии данных натурных наблюдений. Таким образом реализуется одно из основных предназначений моделирования – выход за рамки возможного натурального эксперимента. Проведена адаптация разработанной ранее в ИНОЗ РАН методики дистанционной оценки характеристик неизученных и малоизученных озера северных территорий к потребностям задач ретроспективной и прогностической оценки изменений ТГД-параметров водной толщи и донных отложений. Термогидродинамический режим большинства озера определяется прежде всего климатическим воздействием и формой озерной котловины. В изложенной методике климатическое воздействие учитывается за счет использования данных метеорологического реанализа при ретроспективной оценке характеристик озера и разных прогностических сценариев изменения метеорологических параметров, соответствующих различным сценариям выброса парниковых газов в атмосферу в будущем. Влияние формы котловины на гидротермодинамику озера реализуется через учет соотношений между морфометрическими параметрами водоема, характерных для рассматриваемого озерного региона.

Без сомнения, в ближайшей перспективе будут активно развиваться различные направления исследований, связанных с климатическими прогнозами. Будут созданы более совершенные модели общей циркуляции атмосферы и океана. Изменения региональной социально-экономической ситуации найдут свое отражение в уточненных сценариях поступления в атмосферу парниковых газов. При этом можно заметить, что прогресс всех перечисленных выше направлений научных исследований не затронет общую концепцию методики дистанционной оценки характеристик неизученных и малоизученных озера нашей страны и приведет к существенному уточнению расчетных оценок. Хочется также надеяться на развитие системы мониторинга водных объектов, в рамках которой будет собран материал для апробации в различных озерных регионах и более широкого использования моделей химико-биологических процессов в озерах (например, FLakeEco),

что позволит дополнить таким образом методику, изложенную в настоящей работе.

Литература

Зверев И. С., Расулова А. М., Голосов С. Д., Кондратьев С. А. Дистанционная оценка характеристик неизученных озер северных территорий // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93, № 5. С. 456–461. doi: 10.31857/S0869587323050110

Измайлова А. В. Водные ресурсы озер России // География и природные ресурсы. 2016. № 4. С. 5–14.

Измайлова А. В. Озера России. Закономерности распределения, ресурсный потенциал. СПб.: Папирус, 2018. 288 с.

Кондратьев С. А., Бовыкин И. В. Влияние возможных климатических изменений на гидрологический режим системы водосбор – озеро // Метеорология и гидрология. 2003. № 10. С. 86–96.

Косиков А. Г., Голубева Е. И., Селиверстов Ю. Г., Семин В. Н., Ушакова Л. А., Харьковец Е. Г. Цифровая модель Арктики и экологические исследования // Проблемы региональной экологии. 2019. № 5. С. 46–52.

Национальный атлас России. Т. 2. Природа. Экология / Гл. ред. А. В. Бородко, гл. ред. тома В. М. Котляков. М.: Картография, 2007. 496 с.

Полищук Ю. М., Куприянов М. А., Полищук В. Ю., Попков Ю. С. Использование геоимитационного моделирования для прогноза изменения площадей озер Арктики // Информационные технологии и вычислительные системы. 2024. № 3. С. 95–106. doi: 10.14357/20718632240309

Реки и озера мира: энциклопедия / Институт водных проблем РАН, Институт озероведения РАН, Географический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова; гл. ред. В. И. Данилов-Данильян. М.: Издательство «Энциклопедия», 2012. 928 с.

Румянцев В. А., Дробкова В. Г., Измайлова А. В. Озера азиатской части России // СПб.: Свое издательство, 2017. 480 с.

Рянжин С. В., Ульянова Т. Ю. Геоинформационная система «Озера мира» – GIS WORLDLAKE // Доклады Академии наук. 2000. Т. 370, № 4. С. 542–545.

Семенов С. М., Гладильщикова А. А. Сценарии антропогенных изменений климатической системы в XXI веке // Фундаментальная и прикладная климатология. 2022. Т. 8, № 1. С. 75–106. doi: 10.21513/2410-8758-2022-1-75-106

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

Golosov S., Kirillin G. A parameterized model of heat storage by lake sediments // Environ. Model. Softw. 2010. Vol. 25, no. 6. P. 793–801. doi: 10.1016/j.envsoft.2010.01.002

IPCC: Climate Change 2021: The Physical Science Basis / Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, NY: Cambridge University Press, 2021. 2391 p. doi: 10.1017/9781009157896

Kirillin G., Nützmann G., Hochschild J., Mironov D., Terzhevik A., Golosov S. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage // Environ. Model. Softw. 2011. Vol. 26, no. 5. P. 683–684.

Kondratyev S. A., Golosov S. D., Zverev I. S., Rasulova A. M., Krylova V. Y., Revunova A. V. Assessment of thermal characteristics of lakes in the permafrost zone by mathematical modelling (on the example of lakes in Yakutia) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. No. 6. P. 1380–1398. doi: 10.31951/2658-3518-2024-a-6-1380

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(1). Art. 13603. doi: 10.1038/ncomms13603

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.

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.

Obu J., Westermann S., Bartsch A. et al. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale // Earth-Science Reviews. 2019. Vol. 193. P. 299–316. doi: 10.1016/j.earscirev.2019.04.023

Zdorovenov R., Golosov S., Zverev I., Zdorovenova G., Fedorova I. Arctic climate variability and ice regime of the Lena River delta lakes // E3S Web of Conferences (IV Vinogradov Conference). 2020. Vol. 163. Art. 04008. doi: 10.1051/e3sconf/202016304008

Zverev I. S., Golosov S. D., Kondratyev 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 Sciences. 2023. Vol. 511, no. 2. P. 726–731. doi: 10.1134/S1028334X23600779

References

Borodko A. V., Kotlyakov V. M. (eds.). National atlas of Russia. Vol. 2. Nature. Ecology. Moscow: Kartografiya; 2007. 496 p. (In Russ.)

Danilov-Danil'yan V. I. (ed.). Rivers and lakes of the world: an encyclopaedia. Moscow: Izdatel'stvo "Encyclopedia"; 2012. 928 p. (In Russ.)

Golosov S., Kirillin G. A parameterized model of heat storage by lake sediments. *Environ. Model. Softw.* 2010;25(6):793–801. doi: 10.1016/j.envsoft.2010.01.002

IPCC: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, NY: Cambridge University Press; 2021. 2391 p. doi: 10.1017/9781009157896

Izmailova A. V. Lakes of Russia. Distribution patterns, resource potential. St. Petersburg: Papirus; 2018. 288 p. (In Russ.)

Izmailova A. V. Water resources of the lakes of Russia. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and*

Natural Resources. 2016;37:281–289. (In Russ.). doi: 10.1134/S1875372816040016

Kirillin G., Nützmann G., Hochschild J., Mironov D., Terzhevik A., Golosov S. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage. *Environ. Model. Softw.* 2011;26(5):683–684.

Kondrat'ev S. A., Bovykin I. V. Influence of possible climate changes on hydrological regime of a catchment-lake system. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2003;10:57–64.

Kondratyev S. A., Golosov S. D., Zverev I. S., Rasulova A. M., Krylova V. Y., Revunova A. V. Assessment of thermal characteristics of lakes in the permafrost zone by mathematical modelling (on the example of lakes in Yakutia). *Limnology and Freshwater Biology*. 2024;6:1380–1398. doi: 10.31951/2658-3518-2024-a-6-1380

Kosikov A. G., Golubeva E. I., Seliverstov Yu. G., Semina V. N., Ushakova L. A., Khar'kovets E. G. Digital model of the Arctic and environmental research. *Problemy regional'noi ekologii = Regional Environmental Issues*. 2019;5:46–52. (In Russ.)

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;7(1):13603. doi: 10.1038/ncomms13603

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;15:218–230.

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.

Obu J., Westermann S., Bartsch A., et al. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. *Earth-Science Reviews*. 2019;193:299–316. doi: 10.1016/j.earscirev.2019.04.023

Polishchuk Yu. M., Kupriyanov M. A., Polishchuk V. Yu., Popkov Yu. S. Using geo-simulation modeling to predict changes in the Arctic lake areas. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy = Journal of Information Technologies and Computation Systems*. 2024;3:95–106. (In Russ.). doi: 10.14357/20718632240309

Rumyantsev V. A., Drabkova V. G., Izmailova A. V. Lakes of the Asian part of Russia. St. Petersburg: Svoe izdatel'stvo; 2017. 480 p. (In Russ.)

Ryanzhin S. V., Ul'yanova T. Yu. The World Lakes geoinformation system (GIS WORDLAKE). *Doklady Earth Sciences*. 2000;370:214–216.

Semenov S. M., Gladil'shchikova A. A. Scenarios of anthropogenic changes in the climate system in the 21st century. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and Applied Climatology*. 2022;8(1):75–106. (In Russ.). doi: 10.21513/2410-8758-2022-1-75-106

Terzhevik A. Yu., Pal'shin N. I., Golosov S. D., Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E., Mitrokhov A. V., Potakhin M. S., Shipunova E. A., Zverev I. S. Hydrophysical aspects of oxygen regime formation in a shallow ice-covered lake. *Water Resources*. 2010;37(5):662–673. doi: 10.1134/S0097807810050064

Zdorovenov R., Golosov S., Zverev I., Zdorovenova G., Fedorova I. Arctic climate variability and ice regime of the Lena River delta lakes. *E3S Web of Conferences (IV Vinogradov Conference)*. 2020;163:04008. doi: 10.1051/e3sconf/202016304008

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 Sciences*. 2023;511(2):726–731. doi: 10.1134/s1028334x23600779

Zverev I. S., Rasulova A. M., Golosov S. D., Kondrat'ev S. A. Remote sensing characterisation of unstudied lakes in the northern territories. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk = Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2023;93(5):456–461. (In Russ.). doi: 10.31857/S0869587323050110

Поступила в редакцию / received: 13.02.2025; принята к публикации / accepted: 21.02.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Кондратьев Сергей Алексеевич

д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник

e-mail: 3718470@gmail.com; kondratyev@limno.org.ru

Голосов Сергей Дмитриевич

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

e-mail: sergey_golosov@mail.ru

Зверев Илья Сергеевич

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

e-mail: iliazverev@mail.ru

Расулова Анна Мурадовна

канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник

e-mail: arasulova@limno.ru

CONTRIBUTORS:

Kondratyev, Sergey

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher

Golosov, Sergey

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher

Zverev, Ilya

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher

Rasulova, Anna

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher