

Воспроизведение моделью LAKE температуры поверхности крупнейших озёр Земли: система автоматической калибровки по данным MODIS

В. М. Степаненко^{1,3}, И. А. Репина^{2,1,4}, А. И. Медведев^{1,3}, В. А. Романенко^{2,1}

¹ Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ
имени М. В. Ломоносова, Москва, 119991, Россия
E-mail: stepanen@srcc.msu.ru

² Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, 119017, Россия

³ Гидрометцентр России, Москва, 123376, Россия

⁴ Майкопский государственный технологический университет
Майкоп, 385000, Россия

Одномерные модели водоёмов суши в силу вычислительной экономичности применяются в широком спектре приложений — от исследований термогидродинамики и экологии озёр до прогноза погоды и оценки будущих изменений климата. В настоящей работе представлена система оптимизации известной одномерной модели LAKE (*англ.* lake — озеро) в части воспроизведения температуры поверхности с использованием метеорологических переменных из реанализа ERA5 Европейского центра среднесрочных прогнозов (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Reanalysis of Atmosphere) и с привлечением спутниковых данных по озёрам Байкал, Балхаш, Большое Медвежье, Верхнее, Виктория, Виннипег, Ладожское, Онежское, Танганьика. Уточнение коэффициента фоновой диффузии (температуропроводности) и коэффициента поглощения фотосинтетически-активной радиации в водной толще проводится методом ROPE (*англ.* RObust Parameter Estimation), реализованным в библиотеке SPOTPY (*англ.* Statistical Parameter Optimization Tool for PYthon). Модель водоёма LAKE удовлетворительно воспроизводит временной ход средней по поверхности месячной температуры поверхности со среднеквадратическим отклонением в диапазоне 1–2 °C после калибровки параметров. Коэффициенты поглощения и фоновой диффузии регулируют распределение тепла в водоёме по вертикали; это приводит к эффекту «эквивалентности», т. е. неединственности оптимального сочетания этих параметров. Калибровка выбранных параметров позволяет эффективно сократить годовую амплитуду температуры поверхности, в то же время проблема занижения моделью температуры поверхности в летний период, вызванная запоздалым сходом в модели ледяного покрова, вариацией данных параметров не решается. Модель систематически завышает на 2–3 °C температуру поверхности тропических озёр Виктория и Танганьика. Перспективы развития настоящей работы заключаются в разработке новых физически корректных параметризаций вертикального переноса импульса и скалярных величин в мета- и гипolimнионе водоёмов. Кроме того, в модели LAKE целесообразно провести ревизию модели переноса радиации в снежном и ледяном покрове, а параметры модифицированной модели радиации включить в систему калибровки.

Ключевые слова: озёра, температура поверхности, MODIS, одномерная модель термогидродинамики, LAKE, оптимизация, численный прогноз погоды

Одобрена к печати: 07.10.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-267-283

Введение

Водные объекты суши играют существенную роль в формировании локальных условий погоды. Так, вдоль побережья крупных озёр в тёплое время года образуется бризовая циркуляция (Степаненко и др., 2007; Cheng et al., 2023; Comer, McKendry, 1993), при этом ночной бриз в сочетании с атмосферной конвекцией может приводить к экстремальным осадкам. Осенью крупные водоёмы умеренных широт в силу большой интегральной теплоёмкости становятся тёплыми по сравнению с окружающей суши и служат источниками испарения и образования слоистой (Eerola et al., 2014) и кучевой (Вазаева и др., 2022; Forbes, Merritt, 1984) облачности. В свою очередь, с этой облачностью связаны как интенсивные осадки

(Barthold, Kristovich, 2011), так и значительные изменения приземной температуры воздуха (Eerola et al., 2014). Совместный эффект конвергенции ночного бриза и высокого интегрального влагосодержания воздушной массы приводит к экстремальным ночным грозам над крупными тропическими водоёмами (Thiery et al., 2016).

Неуклонно повышающееся пространственное разрешение глобальных (до 5–10 км) и региональных (до 1 км и менее) гидродинамических моделей погоды и климата привело 10–15 лет назад к тому, что упомянутые выше мезомасштабные атмосферные циркуляции стали разрешаться явно, так что для реалистичного воспроизведения потоков энергии и водяного пара на поверхности водных объектов суши потребовались параметризации термогидродинамических процессов в толще водных объектов (далее — «параметризации озёр»). Эти параметризации были внедрены в ведущие системы численного прогноза погоды и модели земной системы (Balsamo et al., 2012; Bogomolov et al., 2016; Fujisaki-Manome et al., 2020; Le Moigne et al., 2016; Ljungemyr et al., 1996; Martynov et al., 2012; Mironov et al., 2010; Rooney, Bornemann, 2013; Subin et al., 2012). Все параметризации в глобальных моделях представляют собой одномерные (по вертикали) модели переноса тепла и радиации в водном столбе, включая ледяной и снежный покров в зимнее время года. Отсюда ключевыми параметрами таких моделей, определяющими высокую эффективную теплоёмкость (сравнительно с системой «почва – растительность»), являются коэффициенты вертикальной теплопроводности и ослабления коротковолновой радиации в водной среде.

Проверка параметризации озёр с привлечением данных измерений проводится как в автономном режиме (с предписанным атмосферным воздействием) (Guseva et al., 2020; Stepanenko et al., 2013; Thiery et al., 2014), так и в рамках совместных моделей, включающих обратные связи между атмосферой и водным объектом (Tuguncoglu et al., 2013). Известно, что с предписанным по данным измерений воздействием одномерные модели удовлетворительно воспроизводят температуру поверхности воды и турбулентные потоки явного и скрытого тепла в атмосферу. В таких численных экспериментах обычно задаются радиационные свойства воды по данным измерений, например прозрачность по глубине диска Секки. Вертикальный турбулентный перенос тепла параметризуется с помощью турбулентного замыкания. Турбулентные замыкания варьируются в широком диапазоне сложности: от гипотез самоподобия вертикального профиля температуры (Goloso et al., 2018), моделей интегрального баланса энергии в перемешанном слое (Hipsey et al., 2019) и диагностических турбулентных замыканий 1-го порядка (параметризация Хендерсон-Селлерса для устойчивой стратификации (Henderson-Sellers, 1985), KPP (*англ.* K-Profile Parameterization) (Zhang et al., 2019)) до одно- ($k-L$ замыкание (Sun et al., 2020)) и двухпараметрических замыканий 1,5-го порядка ($k-kL$, $k-\omega$, $k-\epsilon$ замыкания и их модификации (Gaudard et al., 2019; Stepanenko et al., 2016)). Турбулентное перемешивание тепла и примесей в эпиплимнионе и толщина этого слоя, как правило, успешно воспроизводятся на основе хорошо изученных одномерных турбулентных замыканий уравнений Рейнольдса, хотя для малых водоёмов это достигается за счёт искусственного сохранения ускорения Кориолиса в уравнениях движения, в то время как в действительности это ускорение пренебрежимо, и ограничение на развитие перемешанного слоя накладывает горизонтальный размер водоёма (Гладских и др., 2021). В металимнионе и гиполимнионе, где стратификация очень устойчивая, в большинстве турбулентных замыканий коэффициенты турбулентной вязкости и диффузии стремятся к 0, так как они настроены на режим затухающей турбулентности при сверхкритических значениях градиентного числа Ричардсона. В действительности перемешивание в этих слоях обеспечивается трёхмерными течениями (в первую очередь, сейшевыми колебаниями и «производными» от них более мелкомасштабными движениями), которые не воспроизводятся одномерными моделями, и их эффект представлен полуэмпирическими параметризациями. Предложены подходы к моделированию механической энергии сейш и их вклада в вертикальный тепло- и массообмен (Gaudard et al., 2017; Stepanenko et al., 2020), но применение этих методов предполагает тонкую индивидуальную настройку для каждого водного объекта. Поэтому самой распространённой параметризацией является использование аддитивного постоянного коэффициента фоновой диффузии, калибруемого для каждого озера.

Применение модели озера в исследованиях глобальных эффектов (Golub et al., 2022), а также при внедрении в модели прогноза погоды и климата целесообразна калибровка для оптимального воспроизведения наблюдаемых величин, в первую очередь температуры поверхности (Balsamo et al., 2010; Layden et al., 2016). Учитывая перспективу внедрения модели LAKE (*англ.* lake — озеро) в систему численного прогноза погоды, а также эффективного использования в глобальных, региональных и локальных исследованиях, разработана система автоматической калибровки модели. Эта система, а также результаты её применения к воспроизведению температуры поверхности девяти крупнейших пресноводных водоёмов планеты (озёр Байкал, Балхаш, Большое Медвежье (*англ.* Great Bear Lake), Верхнее (*англ.* Lake Superior), Виктория (*англ.* Victoria), Виннипег (*англ.* Winnipeg), Ладожское, Онежское, Танганьика (*англ.* Tanganyika)) представлены в настоящей работе. Оценена эффективность модели, обсуждаются причины расхождения модели с данными измерений и перспективы совершенствования результатов моделирования.

Методы и данные

Модель LAKE

LAKE — это обобщённая одномерная модель термодинамических, гидродинамических и биогеохимических процессов в водном объекте (озере, водохранилище или участке водотока) и донных отложениях (Stepanenko et al., 2016). Она воспроизводит вертикальный перенос тепла с учётом проникновения электромагнитной радиации в ультрафиолетовом (УФ), фотосинтетически-активном радиационном (ФАР), ближнем инфракрасном (БИК) и инфракрасном (ИК) диапазонах волн в водной толще (Heiskanen et al., 2015), слоях льда, снега и донных отложений. Уравнения модели формулируются в терминах величин, осреднённых по горизонтальному сечению водного объекта. В толще воды применяются турбулентное замыкание $k-\epsilon$, а также экономичная в вычислительном отношении параметризация Хендерсон-Селлера, используемая в сопряжении с алгоритмом конвективного приспособления вертикальных профилей прогностических величин. В слоях льда и снега рассчитывается сопряжённый перенос тепла и жидкой воды (Степаненко и др., 2019). В донных отложениях моделируются изменения водной фазы для воспроизведения таликов в зоне вечной мерзлоты. Общий бюджет воды объекта моделируется в явном виде для воспроизведения колебаний уровня озера, а также связанных с ним вертикальных движений в водной толще (Степаненко и др., 2020). Модель также описывает вертикальную диффузию растворённых газов (CO_2 , CH_4 , O_2) и их перенос всплывающими пузырьками, окисление метана, фотосинтез и процессы потребления кислорода в толще воды и донных отложениях за счёт распада мёртвого органического вещества. К другим представленным в модели биогеохимическим субстанциям относятся твёрдые частицы органического вещества (живая и мёртвая фракции, причём живая фракция неявно включает фито- и зоопланктон), хлорофилл a , растворённый органический углерод, растворённый неорганический фосфор. Модель была протестирована в отношении термического и ледового режима на множестве озёр в контрастных климатических условиях — оз. Убсу-Нур в Монголии (*монг.* Увс нуур) (Степаненко и др., 2019); озёрах Аляски (Clark et al., 2022); Женевском озере (*фр.* Lac Léman), Великих озёрах (*англ.* Great Lakes) (Stepanenko et al., 2010); оз. Гроссер Коссенблаттер в Германии (*нем.* Großer Kossenblatter See) (Stepanenko et al., 2013); оз. Валькеа-Котинен в Финляндии (*англ.* Valkea-Kotinen) (Stepanenko et al., 2014); оз. Виктория (Thiery et al., 2014), оз. Большой Вилюй на Камчатке (Stepanenko et al., 2018). Моделирование эмиссии углекислого газа и метана, валидация модели по этим переменным были выполнены для ряда естественных и искусственных водоёмов — Можайского водохранилища (Степаненко и др., 2020), озёр в зоне мерзлоты (Степаненко и др., 2011), оз. Харп в Канаде (*англ.* Harp Lake) (Guseva et al., 2020), вдхр. Алькева в Португалии (*порт.* Albufeira do Alqueva, Lago Alqueva) (Iakunin et al., 2020); оз. Куйвасъярви в Финляндии (*фин.* Kuivasjärvi) (Stepanenko et al., 2016).

В настоящей работе выбрана вычислительно экономичная конфигурация модели, подходящая для одновременного расчёта тысяч водоёмов (что предполагается в рамках систем численного прогноза погоды или моделей земной системы). Используется турбулентное замыкание Хендерсон-Селлерса (Henderson-Sellers, 1985) для представления турбулентной диффузии в устойчивой стратификации и схема конвективного приспособления — для неустойчивой (Vogomolov et al., 2016). Полный коэффициент диффузии (температуропроводности) K_T есть сумма величины $K_{T,H-S}$, рассчитанной по формулам из публикации (Henderson-Sellers, 1985), и впоследствии калибруемой константы $K_{T,b}$:

$$K_T = K_{T,H-S} + K_{T,b}.$$

Считается, что дно водоёма состоит из вертикальных стенок и горизонтального дна. Распространение коротковолновой радиации Q по глубине z описывается следующим выражением:

$$Q(z) = Q_0(1-a) \sum_{i=1}^4 \beta_i \exp\left(-\int_0^z \alpha_i dz\right),$$

где Q_0 — суммарная падающая коротковолновая радиация; a — интегральное альbedo для этой радиации; β_i — доля в энергетическом спектре поглощённой радиации i -го интервала; α_i — коэффициент поглощения для i -го интервала; i — номер интервала, $i = 1$ — УФ, $i = 2$ — ФАР, $i = 3$ — БИК, $i = 4$ — ИК. Во всех спектральных диапазонах, кроме ФАР, электромагнитное излучение поглощается у самой поверхности воды. В дальнейшем обозначим $\alpha_2 = \alpha$ и будем рассматривать как второй, наряду с $K_{T,b}$, параметр (константу для каждого озера) для оптимизации модели.

Метод оптимизации

В качестве способа оптимизации параметров модели LAKE в настоящей работе применяется метод ROPE (англ. RObust Parameter Estimation) (Bárdossy, Singh, 2008), приемлемая эффективность которого была получена в предварительных экспериментах (Stepanenko et al., 2020). Метод заключается в следующем. Пусть необходимо найти точку в p -мерном евклидовом пространстве S_p , минимизирующую меру ошибки модели. Ошибка при этом считается функцией только p -параметров. Вводится понятие полупространственной глубины $D_X(x)$ заданной точки $x \in S_p$ относительно конечного множества точек $X \in S_p$. По определению, $D_X(x)$ — это минимальное число точек множества X , находящихся по одну сторону (в одном полупространстве) от плоскости, проходящей через x , во множестве всех возможных плоскостей. Решение оптимизационной задачи ищется в p -мерном прямоугольнике $\bar{S} \in S_p$, определённых пределах значений всех параметров. Алгоритм состоит из следующих этапов:

1. Случайным образом выбирается множество N точек $X_N \in \bar{S}$.
2. Находятся метрики ошибки модели E во всех точках множества X_N .
3. Полученные на этапе 2 значения E ранжируются и устанавливается подмножество X_N^* , доставляющее заданную долю (например, 10 %) минимальных значений.
4. Случайным образом выбирается множество Y_M такое, что для каждого его элемента y полупространственная глубина $D_{X_N^*}(y) \geq 1$, т.е. новое множество находится «внутри» подмножества X_N с наименьшей ошибкой модели.
5. Для нового множества Y_M повторяются шаги 2–5 до тех пор, пока ошибка модели не примет приемлемое значение или число итераций не превысит максимальное число.

В настоящей работе реализация метода ROPE заимствована из библиотеки SPOTPY (англ. Statistical Parameter Optimization Tool for PYthon) (<https://spotpy.readthedocs.io/en/latest/>) (Houska et al., 2015). Создан интерфейс библиотеки с моделью LAKE и конфигурационный файл для настройки параметров калибровки без изменений исходного кода модели.

Спутниковые данные

Данные дистанционного зондирования в ИК-диапазоне позволяют достаточно надёжно определять среднюю температуру внутренних водоёмов (Ke, Song, 2014; Kraemer et al., 2017; Moukomla, Blanken, 2016; Zhong et al., 2019). Наиболее достоверно температура поверхности озёр восстанавливается по данным сканирующего спектрорадиометра MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, <https://modis.ornl.gov/globalsubset/>), установленного на спутниках Terra и Aqua (программа EOS (*англ.* Earth Observing System), США), и радиометра AVHRR (*англ.* Advanced Very-High-Resolution Radiometer) (Aguilar-Lome et al., 2021; Fan et al., 2022; Phillips et al., 2016; Zhang et al., 2014). Данные MODIS, получаемые в 36 спектральных диапазонах каждые 1–2 дня, широко используются для нахождения информации о физических и биологических процессах как на суше, так и в океане и охватывают период начиная с 2000 г. (Justice et al., 2002; MacCallum, Merchant, 2012). В настоящей работе исследовалась средняя температура поверхности девяти озёр за 2002–2022 гг., расположенных в разных климатических зонах: Байкал, Балхаш, Большое Медвежье, Верхнее, Виктория, Виннипег, Ладожское, Онежское, Танганьика (*рис. 1*).

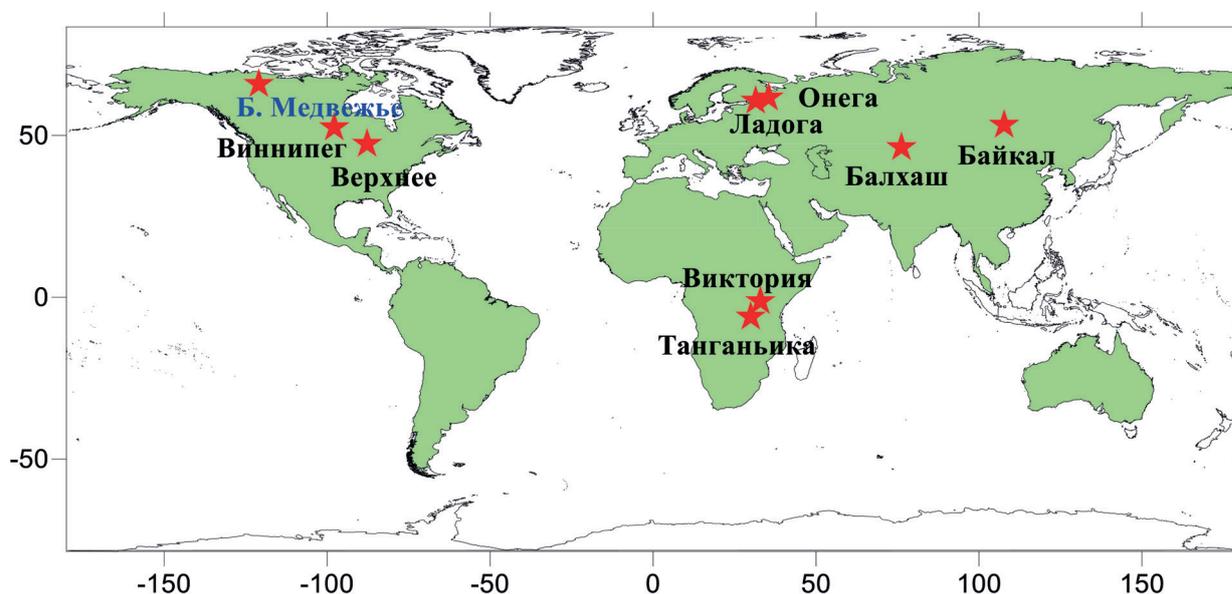


Рис. 1. Географическое положение исследуемых озёр

Ежемесячные данные восстановленной по наблюдениям MODIS ночной и дневной температуры поверхности озёр с разрешением 4 км (продукт Aqua MODIS Global Mapped 11 μm Daytime/Nighttime Sea Surface Temperature Data, version R2019.0) были получены на сайте NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration, <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/>). Сервис Giovanni предоставляет спутниковые данные, прошедшие обработку уровня 3, включая коррекцию рельефа, радиометрическую коррекцию, атмосферную коррекцию и применение маски облаков. Для анализа использовалось среднее значение между дневной и ночной температурой (Mao et al., 2017; Sobrino et al., 2024). Маска озёр бралась из базы данных GLWD (*англ.* Global Lakes and Wetlands Database) (<https://www.worldwildlife.org/publications/global-lakes-and-wetlands-database-large-lake-polygons-level-1>) (Lehner, Döll, 2004; Lehner et al., 2024). При построении маски озера учитывались только те пиксели, которые надёжно расположены на его поверхности и не захватывают участки берега (Hosoda et al., 2007). Для контроля данных и заполнения пропусков в период 2002–2015 гг. использовался архив ARC-Lake (*англ.* ATSR (Along-Track Scanning Radiometer) Reprocessing for Climate — Lake) (https://www.laketemp.net/home_ARCLake/index.php) (Sharma et al., 2015), который включает данные радиометров

ATSR, AATSR (*англ.* Advanced Along-Track Scanning Radiometer) и AVHRR. Для определения начала и окончания ледостава замерзающих озёр использовались данные MODIS (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>) и радиометра MIRAS (*англ.* Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis) (Тихонов и др., 2017). Месяцы, когда озеро было замёрзшим, в анализе не участвовали.

Постановка численных экспериментов

В качестве атмосферного воздействия (граничных условий) для модели LAKE были использованы данные реанализа 5-го поколения ERA5 Европейского центра среднесрочных прогнозов (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Reanalysis of Atmosphere) (Hersbach et al., 2020) по приземным значениям температуры, влажности и давления воздуха, компонентам скорости ветра, коротковолновой и длинноволновой радиации, а также атмосферным осадкам на сетке $0,9 \times 0,72^\circ$ с шагом 3 ч за 2002–2022 гг. Начальным профилем температуры 1 января 2002 г. принималась линейная функция z , соединяющая 0°C на поверхности и 4°C на дне для замерзающих озёр, и такая же функция, но со значением 25°C на поверхности для тропических озёр. Количество уровней модели для всех водоёмов было задано равным 20, шаг конечно-разностной схемы по времени — 1 ч. Глубина озёр заимствована из базы данных GLDBv2 (*англ.* Global Lake DataBase version 2) (Choulga et al., 2014) и ограничена сверху величиной 200 м для приемлемого разрешения верхнего перемешанного слоя глубоких озёр на сетке модели. Эмпирические оценки для коэффициента поглощения были получены по формуле Пула–Аткинса (Poole, Atkins, 1929) $\alpha = 1,7/z_{\text{SD}}$, где z_{SD} — глубина диска Секки; в свою очередь, значения z_{SD} были найдены в базе данных по озёрам мира Международного комитета по проблемам озёр (*англ.* World Lake Database, International Lake Environment Committee, <https://wldb.ilec.or.jp>). В качестве альтернативного способа оценки α привлечена эмпирическая зависимость коэффициента поглощения от средней глубины H (в м) (личное сообщение, Т. Шатвелл):

$$\alpha = c_1 H^{-c_2},$$

где $c_1 = 5,681$, $c_2 = 0,795$. Аналогичная формула впервые опубликована в статье (Håkanson, 1995), но параметры были оптимизированы только для небольших ледниковых озёр. Метод Шатвелла–Хакансона менее точен, чем прямые оценки по измеренной z_{SD} , но может быть легко использован для оценки мутности озёр на глобальной сетке модели погоды или климата с привлечением сеточных баз по глубинам водоёмов (Choulga et al., 2014; Toptunova et al., 2019).

В качестве минимизируемой метрики ошибки модели определено среднеквадратическое отклонение (СКО) временных рядов месячных, осреднённых по поверхности значений, полученных по спутниковым данным, от аналогичных рядов, рассчитанных моделью. Поскольку в LAKE не предусмотрена ситуация частичного покрытия водоёма льдом, все месяцы, когда по спутниковым данным такое покрытие имело место, исключались из расчёта ошибки.

Для калибровки по методу ROPE установлены следующие границы параметров: $K_{T,b} \in (10^{-1}, 10^3) \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, $\alpha \in (5 \cdot 10^{-2}, 2) \text{ м}^{-1}$; в силу диапазона шириной в четыре порядка для параметра K в методе ROPE калибровалась величина $\log_{10} K_{T,b}$. Для исследования эффективности выбранного алгоритма калибровки проведены следующие численные эксперименты:

- БШ: базовый эксперимент с заданием α по эмпирической зависимости Шатвелла, $\alpha = \alpha_S$; $K_{T,b} = 0$;
- БИ: базовый эксперимент с заданием α по эмпирической зависимости от измеренной глубины диска Секки (Poole, Atkins, 1929), $\alpha = \alpha_{\text{PA}}$; $K_{T,b} = 0$;
- КД: $\alpha = \alpha_{\text{PA}}$; $K_{T,b}$ оптимизируется;
- КДО: α и $K_{T,b}$ оптимизируются.

Один расчёт моделью LAKE одного водоёма за период 2002–2022 гг. составил в среднем менее 1 с машинного времени (2,3 ГГц, 2-ядерный процессор Intel Core i5) на 1 год модельного времени. Для калибровки одного параметра $K_{T,b}$ в эксперименте КД для каждого озера проводилось 50 расчётов, для оптимизации α и $K_{T,b}$ в эксперименте КДО — 300 расчётов. Результаты калибровки рассмотрим в следующем разделе.

Результаты и обсуждение

Среднеквадратическая ошибка модели во всех численных экспериментах приведена на *рис. 2*. Для всех озёр, кроме оз. Виннипег, после калибровки параметров СКО температуры поверхности оказывается в диапазоне 1–2 °С, что можно считать приемлемым результатом. Для озёр Онежское, Танганьика, Верхнее и Большое Медвежье калибровка позволяет существенно сократить ошибку модели, для остальных — улучшение результатов моделирования есть, но незначительное. Так, годовой ход температуры Байкала рассчитывается моделью в целом успешно во всех экспериментах (кроме БИ) с СКО 1,49–1,52 °С (*рис. 3а*, см. с. 274). Систематические ошибки модели в воспроизведении амплитуды годового хода и среднегодовой температуры малы. Такие же особенности наблюдаются в расчёте температуры среднеширотных озёр Балхаш, Онежское, Ладожское и Верхнее, поэтому данные по ним на *рис. 3* не приводятся.

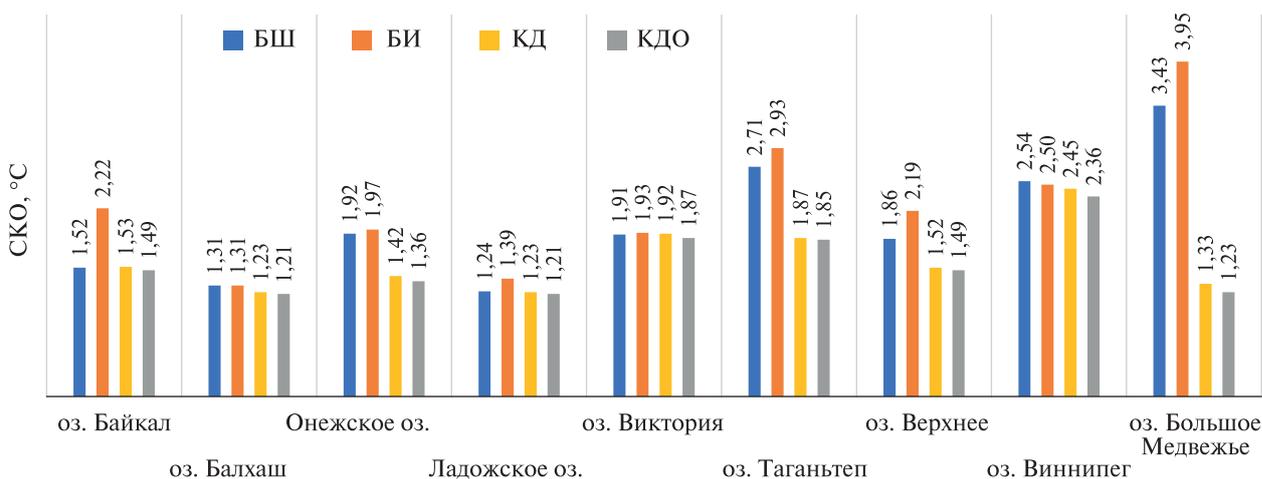


Рис. 2. Среднеквадратическая ошибка воспроизведения моделью LAKE рядов месячной средней по поверхности температуры различных озёр за 2002–2022 гг. в численных экспериментах БШ, БИ, КД и КДО

Среднюю температуру поверхности оз. Виннипег модель занижает (см. *рис. 3в*), причём изменение α и $K_{T,b}$ не позволяет эту систематическую ошибку существенно сократить, СКО остаётся на относительно высоком уровне: 2,36–2,54 °С. Дело в том, что нагрев водоёма происходит сверху, поэтому увеличение $K_{T,b}$ как меры интенсивности вертикального перемешивания способно только понизить температуру поверхности в тёплый период года. В свою очередь, параметр α отвечает за распределение поглощения коротковолновой радиации по глубине. В исследовании (Heiskanen et al., 2015) показано, что α существенно влияет на температуру поверхности только в области малых значений (прозрачная вода), т. е. когда большая часть радиации проникает на большие глубины, что приводит к уменьшению температуры поверхности. В области больших значений, когда величина α^{-1} сравнима с глубиной перемешанного слоя или меньше, большая часть радиации поглощается в перемешанном слое и соответствующее тепло эффективно перемешивается по вертикали. Таким образом, настройка $K_{T,b}$ и α способна уменьшать температуру поверхности в тёплое время года относительно

экспериментов БШ и БИ. Занижение моделью температуры оз. Виннипег, скорее всего, связано с более ранним сходом ледяного покрова в природе, что приводит к более раннему началу нагрева воды по сравнению с моделью. Формальная «регулировка» сроков схода льда в модели возможна через альbedo снежного и ледяного покрова (Layden et al., 2016).

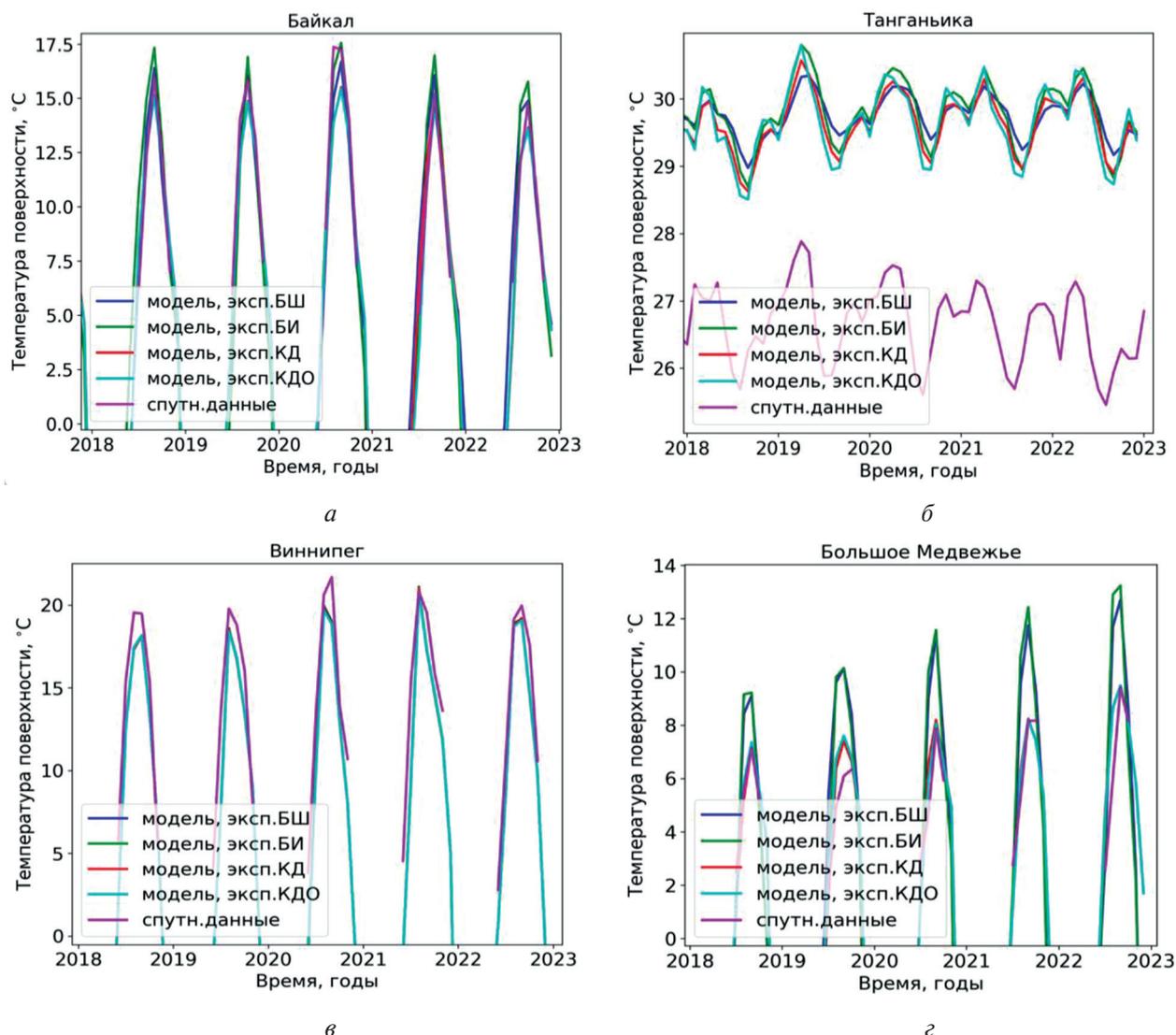


Рис. 3. Временные ряды месячной средней по поверхности температуры избранных озёр за 2018–2022 гг. по результатам модели LAKE в численных экспериментах БШ, БИ, КД и КДО и данным спутниковых измерений

Наиболее эффективной калибровка модели LAKE оказалась для оз. Большое Медвежье (см. рис. 2, 3г), где достигнуто сокращение СКО с 3,43 до 1,23 °C. Здесь в базовых экспериментах БШ и БИ существенно завышалась температура в летние месяцы, что было успешно устранено выбором значения $K_{T,b}$ близкого к верхнему калибровочному пределу $10^3 \text{ м}^2/\text{с}$ (табл. 1).

Модель завышает среднюю температуру поверхности обоих тропических озёр — Виктории и Танганьики (см. рис. 3б) на ~ 2 °C, при том что форму годового хода и его амплитуду модель рассчитывает успешно. В связи с изложенным выше объяснением механизмов действия $K_{T,b}$ и α на модельную температуру поверхности указанный систематический сдвиг не может быть сокращён оптимизацией этих параметров. «Перегрев» тропических озёр может быть связан, в числе прочего, с ошибками реанализа ERA5, поскольку при расчётах LAKE

с измеренными метеорологическими данными для оз. Киву (*англ.* Lake Kivu) (также входящего в группу Великих Африканских озёр), проведённых ранее (Thierry et al., 2014), подобных систематических ошибок обнаружено не было.

Таблица 1. Коэффициент ослабления коротковолновой радиации α и коэффициент фоновой теплопроводности $K_{T,b}$ в различных озёрах, заданные в модели LAKE: предписанные (Шатвелл и набл.) либо полученные в ходе оптимизации (опт.)

Озеро	Эксп. БШ	Эксп. БИ	Эксп. КД		Эксп. КДО	
	$\alpha, \text{ м}^{-1}$ (Шатвелл)	$\alpha, \text{ м}^{-1}$ (набл.)	$\alpha, \text{ м}^{-1}$ (набл.)	$K_{T,b}, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ (опт.)	$\alpha, \text{ м}^{-1}$ (опт.)	$K_{T,b}, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ (опт.)
Байкал	0,03	0,11	0,11	151,36	0,15	177,83
Балхаш	1,78	2,83	2,83	295,12	0,08	2,57
Онежское	0,36	0,49	0,49	37,15	0,23	38,02
Ладожское	0,21	0,49	0,49	23,44	0,28	14,79
Виктория	0,33	1,70	1,70	39,81	0,10	0,66
Танганьика	0,04	0,09	0,09	234,42	0,38	316,23
Верхнее	0,10	0,20	0,20	245,47	0,14	199,53
Виннипег	0,63	1,113	1,113	0,12	1,05	4,79
Большое Медвежье	0,16	0,63	0,63	954,99	0,42	933,25

Примечательно, что минимальные значения СКО модели в экспериментах КД и КДО различаются очень незначительно (см. *рис. 2*). При этом оптимальные значения $K_{T,b}$ и α отличаются на порядки величин, что свидетельствует о «плоском» характере минимизируемой функции. Для большинства озёр разница оптимальных значений КДО–КД для обоих параметров имеет один и тот же знак; это объясняется противоположным влиянием $K_{T,b}$ и α на температуру поверхности, так что при сохранении СКО приращения этих параметров должны иметь одинаковый знак. В целом полученные результаты свидетельствуют об эффекте «эквивинальности» при выборе обоих параметров в качестве калибруемых. Если оставить для калибровки только $K_{T,b}$ и коэффициент поглощения задавать по данным измерений для крупных озёр (для которых соответствующие данные измерений заведомо имеются), а для мелких оценивать по формуле Шатвелла, то проблема эквивинальности будет обойдена, а метрика ошибки модели возрастёт несущественно.

Заключение

Одномерные модели водоёмов суши в силу вычислительной экономичности применяются в широком спектре приложений от исследований термогидродинамики и экологии озёр до прогноза погоды и оценки будущих изменений климата. Применение этих моделей, как правило, сопровождается калибровкой параметров; особенно это касается крупнейших озёр планеты, для которых упрощения одномерного подхода не позволяют явно воспроизводить наибольшее множество типов и масштабов реальных течений, а параметризации этих течений представляют скрывающиеся за ними физические механизмы крайне огрублённо. В настоящей работе представлена система оптимизации известной модели LAKE в части воссоздания температуры поверхности с использованием метеорологических переменных из реанализа ERA5 и с привлечением спутниковых данных по озёрам Байкал, Балхаш, Большое Медвежье, Верхнее, Виктория, Виннипег, Ладожское, Онежское, Танганьика. Уточнение коэффициента фоновой диффузии (теплопроводности) и коэффициента поглощения фотосинтетически активной радиации проводится в водной толще методом ROPE, реализованным в библиотеке SPOTPY. Основные выводы работы заключаются в следующем:

- модель водоёма LAKE удовлетворительно воспроизводит временной ход средней по поверхности месячной температуры поверхности с СКО в диапазоне 1–2 °С после калибровки параметров;
- коэффициенты поглощения и фоновой диффузии регулируют распределение тепла по вертикали в водоёме, поэтому заданное воздействие на температуру поверхности может быть достигнуто подбором как одного, так и второго параметра; это приводит к эффекту «эквививальности», т. е. неединственности оптимального сочетания этих параметров;
- калибровка выбранных параметров позволяет действительно сократить годовую амплитуду температуры поверхности за счёт более эффективной «передачи» тепла от поверхности на большие глубины; в то же время проблема занижения моделью температуры поверхности в летний период, вызванная запоздалым сходом в модели ледяного покрова, вариацией данных параметров не решается;
- модель систематически завышает на 2–3 °С температуру поверхности тропических озёр Виктория и Танганьика; настоящий эффект связан, вероятно, с качеством данных ERA5 и требует отдельного изучения.

При этом надо учитывать, что восстановление температуры поверхности по спутниковым данным также происходит с применением определённой модели и в зависимости от внешних условий может возникать расхождение с наземными измерениями. В настоящей работе наземные измерения к валидации модели не привлекались. Но в данном случае использование наземных гидрологических постов для сравнения, особенно для больших озёр, также затруднено в связи с неравномерностью распределения температуры поверхности, а модель даёт среднюю температуру поверхности озера. Кроме того, ошибки могут быть связаны с эффектом холодной плёнки — температура поверхности, определяемая со спутника, отличается от температуры, измеряемой на некоторой глубине контактным датчиком. Это может приводить к существенным расхождениям наземных измерений и с моделью, и со спутниковыми данными (Степаненко и др., 2019). Впрочем, анализ, проведённый для озёр Китая, продемонстрировал хорошую согласованность между данными MODIS и наземными измерениями (Xie et al., 2022). Сравнение спутниковых и наземных наблюдений при формировании глобальной базы по температуре озёр GLTC (*англ.* Global Lake Temperature Collaboration, <https://www.laketemperature.org>) показало среднеквадратичную ошибку в 1,15 °С. В дальнейшем при введении и развитии в модели LAKE новых параметризаций предполагается провести валидацию спутниковых и модельных данных о температуре поверхности с доступными наземными измерениями и информацией GLTC.

Перспективы развития настоящей работы заключаются в разработке новых физически корректных параметризаций вертикального переноса импульса и скалярных величин в мета- и гипolimнионе водоёмов, в которых оптимальные значения эмпирических констант демонстрировали бы значительно меньший разброс между озёрами по сравнению с постоянным коэффициентом диффузии в настоящей работе. Кроме того, в модели LAKE целесообразно провести ревизию модели переноса радиации в снежном и ледяном покрове, а параметры модифицированной модели радиации включить в систему калибровки.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 21-17-00254).

Литература

1. Вазаева Н. В., Репина И. А., Шестакова А. А., Ганбат Г. Мезомасштабный вихрь над озером Убсу-Нур (Увс-Нуур): анализ и численное моделирование // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 306–317. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-306-317.
2. Гладских Д. С., Степаненко В. М., Мортиков Е. В. О влиянии горизонтальных размеров внутренних водоёмов на толщину верхнего перемешанного слоя // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 2. С. 155–163. DOI: 10.31857/S0321059621020061.

3. Степаненко В. М., Миранда П. М., Лыкосов В. Н. Численное моделирование мезомасштабного взаимодействия атмосферы и гидрологически неоднородной суши // Вычисл. технологии. 2007. Т. 11. № 3. С. 118–127.
4. Степаненко В. М., Мачульская Е. Е., Глаголев М. В., Лыкосов В. Н. Моделирование эмиссии метана из озёр зоны вечной мерзлоты // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 2. С. 275–288.
5. Степаненко В. М., Репина И. А., Ганбат Г., Даваа Г. Моделирование ледового режима соленых озер // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 152–163. DOI: 10.31857/S0002-3515531152-163.
6. Степаненко В. М., Гречушников М. Г., Репина И. А. Численное моделирование эмиссии метана из водохранилища // Фундам. и приклад. климатология. 2020. № 2. С. 76–99. DOI: 10.21513/2410-8758-2020-2-76-99.
7. Тихонов В. В., Хвостов И. В., Романов А. Н., Шарков Е. А. Анализ изменений ледяного покрова пресноводных водоемов по данным SMOS // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 6. С. 46–53. DOI: 10.7868/S0205961417060045.
8. Aguilar-Lome J., Soca-Flores R., Gómez D. Evaluation of the Lake Titicaca's surface water temperature using LST MODIS time series (2000–2020) // J. South American Earth Sciences. 2021. V. 112. Article 103609. DOI: 10.1016/j.jsames.2021.103609.
9. Balsamo G., Dutra E., Stepanenko V. M. et al. Deriving an effective lake depth from satellite lake surface temperature data: a feasibility study with MODIS data // Boreal Environment Research. 2010. V. 15. P. 178–190.
10. Balsamo G., Salgado R., Dutra E. et al. On the contribution of lakes in predicting near-surface temperature in a global weather forecasting model // Tellus A. 2012. V. 64. Article 15829. DOI: 10.3402/tellusa.v64i0.15829.
11. Bárdossy A., Singh S. K. Robust estimation of hydrological model parameters // Hydrology and Earth System Sciences. 2008. V. 12. No. 6. P. 1273–1283. DOI: 10.5194/hessd-5-1641-2008.
12. Barthold F. E., Kristovich D. A. R. Observations of the cross-lake cloud and snow evolution in a lake-effect snow event // Monthly Weather Review. 2011. V. 139. No. 8. P. 2386–2398. DOI: 10.1175/MWR-D-10-05001.1.
13. Bogomolov V., Stepanenko V., Volodin E. Development of lake parametrization in the INMCM climate model // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. 2016. V. 48. No. 1. Article 012005. DOI: 10.1088/1755-1315/48/1/012005.
14. Cheng Y., Shen L., Teng M. et al. How to use lake breeze circulations to improve urban natural ventilation: A case study in a typical inland multi-lake megacity // Landscape and Urban Planning. 2023. V. 230. Article 104628. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2022.104628.
15. Choulga M., Kourzeneva E., Zakharova E., Doganovsky A. Estimation of the mean depth of boreal lakes for use in numerical weather prediction and climate modelling // Tellus A. 2014. V. 66. Article 21295. DOI: 10.3402/tellusa.v66.21295.
16. Clark J. A., Jafarov E. E., Tape K. D. et al. Thermal modeling of three lakes within the continuous permafrost zone in Alaska using the LAKE 2.0 model // Geoscientific Model Development. 2022. V. 15. No. 19. P. 7421–7448. DOI: 10.5194/gmd-15-7421-2022.
17. Comer N. T., McKendry I. G. Observations and numerical modelling of Lake Ontario breezes // Atmosphere-Ocean. 1993. V. 31. No. 4. P. 481–499. DOI: 10.1080/07055900.1993.9649482.
18. Eerola K., Kourzeneva E., Pour H. Kh., Duguay C. Impact of partly ice-free Lake Ladoga on temperature and cloudiness in an anticyclonic winter situation — a case study using a limited area model // Tellus A. 2014. V. 66. Article 23929. DOI: 10.3402/tellusa.v66.23929.
19. Fan C., Liu K., Luo S. et al. Detection of surface water temperature variations of Mongolian lakes benefiting from the spatially and temporally gap-filled MODIS data // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2022. V. 114. Article 103073. DOI: 10.1016/j.jag.2022.103073.
20. Forbes G. S., Merritt J. H. Mesoscale vortices over the Great Lakes in wintertime // Monthly Weather Review. 1984. V. 112. No. 2. P. 377–381. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1984\)112<0377:MVOTGL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1984)112<0377:MVOTGL>2.0.CO;2).
21. Fujisaki-Manome A., Mann G. E., Anderson E. J. et al. Improvements to lake-effect snow forecasts using a one-way air-lake model coupling approach // J. Hydrometeorology. 2020. V. 21. No. 12. P. 2813–2828. DOI: 10.1175/JHM-D-20-0079.1.
22. Gaudard A., Schwefel R., Vinnå L. R. et al. Optimizing the parameterization of deep mixing and internal seiches in one-dimensional hydrodynamic models: A case study with Simstrat v1.3 // Geoscientific Model Development. 2017. V. 10. No. 9. P. 3411–3423. DOI: 10.5194/gmd-10-3411-2017.
23. Gaudard A., Vinnå L. R., Bärenbold F. et al. Toward an open access to high-frequency lake modeling and statistics data for scientists and practitioners — the case of Swiss lakes using Simstrat v2.1 // Geoscientific Model Development. 2019. V. 12. No. 9. P. 3955–3974. DOI: 10.5194/gmd-12-3955-2019.

24. Golosov S., Zverev I., Shipunova E., Terzhevnik A. Modified parameterization of the vertical water temperature profile in the FLake model // *Tellus A.* 2018. V. 70. Article 1441247. DOI: 10.1080/16000870.2018.1441247.
25. Golub M., Thiery W., Marcé R. et al. A framework for ensemble modelling of climate change impacts on lakes worldwide: The ISIMIP Lake Sector // *Geoscientific Model Development.* 2022. V. 15. No. 11. P. 4597–4623. DOI: 10.5194/gmd-15-4597-2022.
26. Guseva S., Bleninger T., Jöhnk K. et al. Multimodel simulation of vertical gas transfer in a temperate lake // *Hydrology and Earth System Sciences.* 2020. V. 24. No. 2. P. 697–715. DOI: 10.5194/hess-24-697-2020.
27. Håkanson L. Models to predict Secchi depth in small glacial lakes // *Aquatic Sciences.* 1995. V. 57. No. 1. P. 31–53. DOI: 10.1007/BF00878025.
28. Heiskanen J.J., Mammarella I., Ojala A. et al. Effects of water clarity on lake stratification and lake-atmosphere heat exchange // *J. Geophysical Research: Atmospheres.* 2015. V. 120. No. 15. P. 7412–7428. DOI: 10.1002/2014JD022938.
29. Henderson-Sellers B. New formulation of eddy diffusion thermocline models // *Applied Mathematical Modelling.* 1985. V. 9. P. 441–446. DOI: 10.1016/0307-904X(85)90110-6.
30. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis // *Quarterly J. Royal Meteorological Soc.* 2020. V. 146. No. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
31. Hipsey M.R., Bruce L.C., Boon C. et al. A General Lake Model (GLM 3.0) for linking with high-frequency sensor data from the Global Lake Ecological Observatory Network (GLEON) // *Geoscientific Model Development.* 2019. V. 12. No. 1. P. 473–523. DOI: 10.5194/gmd-12-473-2019.
32. Hosoda K., Murakami H., Sakaida F., Kawamura H. Algorithm and validation of sea surface temperature observation using MODIS sensors aboard terra and aqua in the western North Pacific // *J. Oceanography.* 2007. V. 63. Iss. 2. P. 267–280. DOI: 10.1007/s10872-007-0027-4.
33. Houska T., Kraft Ph., Chamorro-Chavez A., Breuer L. SPOTting Model parameters using a ready-made python package // *PLoS ONE.* 2015. V. 10. No. 12. Article e0145180. DOI: 10.1371/journal.pone.0145180.
34. Iakunin M., Stepanenko V., Salgado R. et al. Numerical study of the seasonal thermal and gas regimes of the largest artificial reservoir in Western Europe using the LAKE 2.0 model // *Geoscientific Model Development.* 2020. V. 13. No. 8. P. 3475–3488. DOI: 10.5194/gmd-13-3475-2020.
35. Justice C., Townshend J., Vermote E. et al. An overview of MODIS Land data processing and product status // *Remote Sensing of Environment.* 2002. V. 83. P. 3–15. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00084-6.
36. Ke L., Song C. Remotely sensed surface temperature variation of an inland saline lake over the central Qinghai–Tibet Plateau // *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing.* 2014. V. 98. P. 157–167. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.09.007.
37. Kraemer B.M., Mehner T., Adrian R. Reconciling the opposing effects of warming on phytoplankton biomass in 188 large lakes // *Scientific Reports.* 2017. V. 7. Article 10762. DOI: 10.1038/s41598-017-11167-3.
38. Layden A., MacCallum S.N., Merchant C.J. Determining lake surface water temperatures worldwide using a tuned one-dimensional lake model (FLake, v1) // *Geoscientific Model Development.* 2016. V. 9. No. 6. P. 2167–2189. DOI: 10.5194/gmd-9-2167-2016.
39. Le Moigne P., Colin J., Decharme B. Impact of lake surface temperatures simulated by the FLake scheme in the CNRM-CM5 climate model // *Tellus A.* 2016. V. 68. Article 31274. DOI: 10.3402/tellusa.v68.31274.
40. Lehner B., Döll P. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands // *J. Hydrology.* 2004. V. 296. No. 1–4. P. 1–22. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.03.028.
41. Lehner B., Anand M., Fluet-Chouinard E. et al. Mapping the world’s inland surface waters: An update to the Global Lakes and Wetlands Database (GLWD v2) // *Earth System Science Data Discussions [preprint].* 2024. DOI: 10.5194/essd-2024-204.
42. Ljungemyr P., Gustafsson N., Omstedt A. Parameterization of lake thermodynamics in a high-resolution weather forecasting model // *Tellus A.* 1996. V. 48. P. 608–621. DOI: 10.1034/j.1600-0870.1996.t01-4-00002.x.
43. MacCallum S.N., Merchant C.J. Surface water temperature observations of large lakes by optimal estimation // *Canadian J. Remote Sensing.* 2012. V. 38. Iss. 1. P. 25–45. DOI: 10.5589/m12-010.
44. Mao K.B., Ma Y., Tan X.A. et al. Global surface temperature change analysis based on MODIS data in recent twelve years // *Advances in Space Research.* 2017. V. 59. No. 2. P. 503–512. DOI: 10.1016/j.asr.2016.11.007.
45. Martynov A., Sushama L., Laprise R. et al. Interactive lakes in the Canadian Regional Climate Model, version 5: The role of lakes in the regional climate of North America // *Tellus A.* 2012. V. 64. Article 16226. DOI: 10.3402/tellusa.v64i0.16226.
46. Mironov D., Heise E., Kourzeneva E. et al. Implementation of the lake parameterisation scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO // *Boreal Environment Research.* 2010. V. 15. P. 218–230.
47. Moukomla S., Blanken P. Remote sensing of the North American Laurentian Great Lakes’ surface temperature // *Remote Sensing.* 2016. V. 8. Iss. 4. Article 286. DOI: 10.3390/rs8040286.

48. Phillips R. C., Saylor J. R., Kaye N. B., Gibert J. M. A multi-lake study of seasonal variation in lake surface evaporation using MODIS satellite-derived surface temperature // *Limnology*. 2016. V. 17. Iss. 3. P. 273–289. DOI: 10.1007/s10201-016-0481-z.
49. Poole H. H., Atkins W. R. G. Photo-electric measurements of submarine illumination throughout the year // *J. Marine Biological Association of the United Kingdom*. 1929. V. 16. No. 1. P. 297–324. DOI: 10.1017/S0025315400029829.
50. Rooney G. G., Bornemann J. F. The performance of FLake in the Met Office Unified Model // *Tellus A*. 2013. V. 65. No. 1. Article 21363. DOI: 10.3402/tellusa.v65i0.21363.
51. Sharma S., Gray D. K., Read J. S. et al. A global database of lake surface temperatures collected by in situ and satellite methods from 1985–2009 // *Scientific Data*. 2015. V. 2. Article 150008. DOI: 10.1038/sdata.2015.8.
52. Sobrino J. A., García-Monteiro S., Julien Y. An analysis of the lake surface water temperature evolution of the world's largest lakes during the years 2003–2020 using MODIS data // *Recent Advances in Remote Sensing*. 2024. <https://doi.org/10.62880/rars240001>.
53. Stepanenko V. M., Martynov A., Goyette S., Fang X., Perroud M., Mironov D. First steps of a Lake Model Intercomparison Project // *Boreal Environment Research*. 2010. V. 15. P. 191–202.
54. Stepanenko V. M., Martynov A., Jöhnk K. D. et al. A one-dimensional model intercomparison study of thermal regime of a shallow, turbid midlatitude lake // *Geoscientific Model Development*. 2013. V. 6. No. 4. P. 1337–1352. DOI: 10.5194/gmd-6-1337-2013.
55. Stepanenko V., Jöhnk K. D., Machulskaya E. et al. Simulation of surface energy fluxes and stratification of a small boreal lake by a set of one-dimensional models // *Tellus A*. 2014. V. 66. Article 21389. DOI: 10.3402/tellusa.v66.21389.
56. Stepanenko V., Mammarella I., Ojala A. et al. LAKE 2.0: A model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes // *Geoscientific Model Development*. 2016. V. 9. No. 5. P. 1977–2006. DOI: 10.5194/gmd-9-1977-2016.
57. Stepanenko V. M., Repina I. A., Artamonov A. Y. et al. Mid-depth temperature maximum in an estuarine lake // *Environmental Research Letters*. 2018. V. 13. No. 3. Article 035006. DOI: 10.1088/1748-9326/aaad75.
58. Stepanenko V. M., Valerio G., Pilotti M. Horizontal pressure gradient parameterization for one-dimensional lake models // *J. Advances in Modeling Earth Systems*. 2020. Article e21063. DOI: 10.1029/2019MS001906.
59. Subin Z. M., Murphy L. N., Li F. et al. Boreal lakes moderate seasonal and diurnal temperature variation and perturb atmospheric circulation: analyses in the Community Earth System Model 1 (CESM1) // *Tellus A*. 2012. V. 64. Article 15639. DOI: 10.3402/tellusa.v64i0.15639.
60. Sun L., Ling T., Xu M., Lee X. Improving a multilevel turbulence closure model for a shallow lake in comparison with other 1-D models // *J. Advances in Modeling Earth Systems*. 2020. V. 12. No. 7. Article e2019MS001971. DOI: 10.1029/2019MS001971.
61. Thiery W., Stepanenko V. M., Fang X. et al. LakeMIP Kivu: evaluating the representation of a large, deep tropical lake by a set of one-dimensional lake models // *Tellus A*. 2014. V. 66. Article 21390. DOI: 10.3402/tellusa.v66.21390.
62. Thiery W., Davin E. L., Seneviratne S. I. et al. Hazardous thunderstorm intensification over Lake Victoria // *Nature Communications*. 2016. V. 7. Article 12786. DOI: 10.1038/ncomms12786.
63. Toptunova O., Choulga M., Kurzeneva E. Status and progress in global lake database developments // *Advances in Science and Research*. 2019. V. 16. P. 57–61. DOI: 10.5194/asr-16-57-2019.
64. Turuncoglu U. U., Elguindi N., Giorgi F. et al. Development and validation of a regional coupled atmosphere lake model for the Caspian Sea Basin // *Climate Dynamics*. 2013. V. 41. No. 7–8. P. 1731–1748. DOI: 10.1007/s00382-012-1623-6.
65. Xie C., Zhang X., Zhuang L. et al. Analysis of surface temperature variation of lakes in China using MODIS land surface temperature data // *Scientific Reports*. 2022. V. 12. No. 1. Article 2415. DOI: 10.1038/s41598-022-06363-9.
66. Zhang G., Yao T., Xie H. et al. Estimating surface temperature changes of lakes in the Tibetan Plateau using MODIS LST data // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2014. V. 119. No. 14. P. 8552–8567. DOI: 10.1002/2014JD021615.
67. Zhang Q., Jin J., Wang X. et al. Improving lake mixing process simulations in the Community Land Model by using K-profile parameterization // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2019. V. 23. No. 12. P. 4969–4982. DOI: 10.5194/hess-23-4969-2019.
68. Zhong Y., Notaro M., Vavrus S. J. Spatially variable warming of the Laurentian Great Lakes: An interaction of bathymetry and climate // *Climate Dynamics*. 2019. V. 52. No. 9–10. P. 5833–5848. DOI: 10.1007/s00382-018-4481-z.

Reproduction of the largest Earth lakes surface temperature by the LAKE model: Automatic calibration system based on MODIS data

V. M. Stepanenko^{1,3}, I. A. Repina^{2,1,4}, A. I. Medvedev^{1,3}, V. A. Romanenko^{2,1}

¹ *Research Computing Center of Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia
E-mail: stepanen@srcc.msu.ru*

² *A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow 119017, Russia*

³ *Hydrometeorological Center of Russia, Moscow 123376, Russia*

⁴ *Maikop State Technological University, Maikop 385000, Russia*

Due to their computational efficiency, one-dimensional models of land reservoirs are used in a wide range of applications from studies of thermohydrodynamics and lake ecology to weather forecasting and assessment of future climate change. This paper presents a system for optimizing well-known one-dimensional LAKE model in terms of reproducing surface temperature using meteorological variables from the ERA5 (ECMWF Reanalysis v5) reanalysis and satellite data for lakes Baikal, Balkhash, Great Bear, Superior, Victoria, Winnipeg, Ladoga, Onega, Tanganyika. Optimization of the background diffusion coefficient (thermal diffusivity) and the absorption coefficient of photosynthetically active radiation in the water column is carried out by the ROPE (RObust Parameter Estimation) method, implemented in the SPOTPY (Statistical Parameter Optimization Tool for PYthon) library. The LAKE reservoir model satisfactorily reproduces the time course of average monthly surface temperature, with standard deviation in the range of 1–2 °C after parameter calibration. The coefficients of absorption and background diffusion regulate the vertical distribution of heat in a reservoir; this leads to the effect of “equifinality”, i.e. non-uniqueness of the optimal combination of these parameters. Calibration of the selected parameters makes it possible to effectively reduce the annual amplitude of surface temperature; at the same time, the problem of the model underestimating the surface temperature in summer, caused by the delayed melting of the ice cover in the model, is not solved by varying these parameters. The model systematically overestimates the surface temperature of tropical lakes Victoria and Tanganyika by 2–3 °C. The prospects for the development of this work lie in the elaboration of new physically correct parameterizations of the vertical transfer of momentum and scalar quantities in the meta- and hypolimnion of water bodies. In addition, in the LAKE model it is advisable to revise the model of radiation transfer in snow and ice cover and include the parameters of this model in the calibration system.

Keywords: lakes, surface temperature, MODIS, one-dimensional thermohydrodynamics model, LAKE, optimization, numerical weather forecast

Accepted: 07.10.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-267-283

References

1. Vazaeva N. V., Repina I. A., Shestakova A. A., Ganbat G., Mesoscale vortex over Uvs-Nuur: analysis and numerical simulation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 4, pp. 306–317 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-306-317.
2. Gladskikh D. S., Stepanenko V. M., Mortikov E. V., The effect of the horizontal dimensions of inland water bodies on the thickness of the upper mixed layer, *Water Resources*, 2021, Vol. 48, No. 2, pp. 226–234, DOI: 10.1134/S0097807821020068.
3. Stepanenko V. M., Miranda P. M., Lykosov V. N., Numerical simulation of mesoscale interaction of the atmosphere and hydrologically heterogeneous land, *Vychislitel'nye tekhnologii*, 2007, Vol. 11, No. 3, pp. 118–127 (in Russian).
4. Stepanenko V. M., Machul'skaya E. E., Glagolev M. V., Lykosov V. N., Numerical modeling of methane emissions from lakes in the permafrost zone, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2011, Vol. 47, No. 2, pp. 252–264, DOI: 10.1134/S0001433811020113.

5. Stepanenko V. M., Repina I. A., Ganbat G., Davaa G., Numerical simulation of ice cover of saline lakes, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, Vol. 55, No. 1, pp. 129–138, DOI: 10.1134/S0001433819010092.
6. Stepanenko V. M., Grechushnikova M. G., Repina I. A., Numerical simulation of methane emission from an artificial reservoir, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2022, Vol. 58, No. 6, pp. 649–659, DOI: 10.1134/S0001433822060159.
7. Tikhonov V. V., Khvostov I. V., Romanov A. N., Sharkov E. A., Analysis of changes in the ice cover of freshwater lakes by SMOS data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018, No. 9, pp. 1135–1140, DOI: 10.1134/S0001433818090384.
8. Aguilar-Lome J., Soca-Flores R., Gómez D., Evaluation of the Lake Titicaca's surface water temperature using LST MODIS time series (2000–2020), *J. South American Earth Sciences*, 2021, Vol. 112, Article 103609, DOI: 10.1016/j.jsames.2021.103609.
9. Balsamo G., Dutra E., Stepanenko V. M. et al., Deriving an effective lake depth from satellite lake surface temperature data: a feasibility study with MODIS data, *Boreal Environment Research*, 2010, Vol. 15, pp. 178–190.
10. Balsamo G., Salgado R., Dutra E. et al., On the contribution of lakes in predicting near-surface temperature in a global weather forecasting model, *Tellus A*, 2012, Vol. 64, Article 15829, DOI: 10.3402/tellusa.v64i0.15829.
11. Bárdossy A., Singh S. K., Robust estimation of hydrological model parameters, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2008, Vol. 12, No. 6, pp. 1273–1283, DOI: 10.5194/hessd-5-1641-2008.
12. Barthold F. E., Kristovich D. A. R., Observations of the cross-lake cloud and snow evolution in a lake-effect snow event, *Monthly Weather Review*, 2011, Vol. 139, No. 8, pp. 2386–2398, DOI: 10.1175/MWR-D-10-05001.1.
13. Bogomolov V., Stepanenko V., Volodin E., Development of lake parametrization in the INMCM climate model, *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*, 2016, Vol. 48, No. 1, Article 012005, DOI: 10.1088/1755-1315/48/1/012005.
14. Cheng Y., Shen L., Teng M. et al., How to use lake breeze circulations to improve urban natural ventilation: A case study in a typical inland multi-lake megacity, *Landscape and Urban Planning*, 2023, Vol. 230, Article 104628, DOI: 10.1016/j.landurbplan.2022.104628.
15. Choulga M., Kourzeneva E., Zakharova E., Doganovsky A., Estimation of the mean depth of boreal lakes for use in numerical weather prediction and climate modelling, *Tellus A*, 2014, Vol. 66, Article 21295, DOI: 10.3402/tellusa.v66.21295.
16. Clark J. A., Jafarov E. E., Tape K. D. et al., Thermal modeling of three lakes within the continuous permafrost zone in Alaska using the LAKE 2.0 model, *Geoscientific Model Development*, 2022, Vol. 15, No. 19, pp. 7421–7448, DOI: 10.5194/gmd-15-7421-2022.
17. Comer N. T., McKendry I. G., Observations and numerical modelling of Lake Ontario breezes, *Atmosphere-Ocean*, 1993, Vol. 31, No. 4, pp. 481–499, DOI: 10.1080/07055900.1993.9649482.
18. Eerola K., Kourzeneva E., Pour H. Kh., Duguay C., Impact of partly ice-free Lake Ladoga on temperature and cloudiness in an anticyclonic winter situation — a case study using a limited area model, *Tellus A*, 2014, Vol. 66, Article 23929, DOI: 10.3402/tellusa.v66.23929.
19. Fan C., Liu K., Luo S. et al., Detection of surface water temperature variations of Mongolian lakes benefiting from the spatially and temporally gap-filled MODIS data, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, Vol. 114, Article 103073, DOI: 10.1016/j.jag.2022.103073.
20. Forbes G. S., Merritt J. H., Mesoscale vortices over the Great Lakes in wintertime, *Monthly Weather Review*, 1984, Vol. 112, No. 2, pp. 377–381, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1984\)112<0377:MVOTGL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1984)112<0377:MVOTGL>2.0.CO;2).
21. Fujisaki-Manome A., Mann G. E., Anderson E. J. et al., Improvements to lake-effect snow forecasts using a one-way air–lake model coupling approach, *J. Hydrometeorology*, 2020, Vol. 21, No. 12, pp. 2813–2828, DOI: 10.1175/JHM-D-20-0079.1.
22. Gaudard A., Schwefel R., Vinnå L. R. et al., Optimizing the parameterization of deep mixing and internal seiches in one-dimensional hydrodynamic models: A case study with Simstrat v1.3, *Geoscientific Model Development*, 2017, Vol. 10, No. 9, pp. 3411–3423, DOI: 10.5194/gmd-10-3411-2017.
23. Gaudard A., Vinnå L. R., Bärenbold F. et al., Toward an open access to high-frequency lake modeling and statistics data for scientists and practitioners — the case of Swiss lakes using Simstrat v2.1, *Geoscientific Model Development*, 2019, Vol. 12, No. 9, pp. 3955–3974, DOI: 10.5194/gmd-12-3955-2019.
24. Golosov S., Zverev I., Shipunova E., Terzhevik A., Modified parameterization of the vertical water temperature profile in the FLake model, *Tellus A*, 2018, Vol. 70, Article 1441247, DOI: 10.1080/16000870.2018.1441247.
25. Golub M., Thiery W., Marcé R. et al., A framework for ensemble modelling of climate change impacts on lakes worldwide: The ISIMIP Lake Sector, *Geoscientific Model Development*, 2022, Vol. 15, No. 11, pp. 4597–4623, DOI: 10.5194/gmd-15-4597-2022.

26. Guseva S., Bleninger T., Jöhnk K. et al., Multimodel simulation of vertical gas transfer in a temperate lake, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, Vol. 24, No. 2, pp. 697–715, DOI: 10.5194/hess-24-697-2020.
27. Håkanson L., Models to predict Secchi depth in small glacial lakes, *Aquatic Sciences*, 1995, Vol. 57, No. 1, pp. 31–53, DOI: 10.1007/BF00878025.
28. Heiskanen J. J., Mammarella I., Ojala A. et al., Effects of water clarity on lake stratification and lake-atmosphere heat exchange, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, Vol. 120, No. 15, pp. 7412–7428, DOI: 10.1002/2014JD022938.
29. Henderson-Sellers B., New formulation of eddy diffusion thermocline models, *Applied Mathematical Modelling*, 1985, Vol. 9, pp. 441–446, DOI: 10.1016/0307-904X(85)90110-6.
30. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al., The ERA5 global reanalysis, *Quarterly J. Royal Meteorological Soc.*, 2020, Vol. 146, No. 730, pp. 1999–2049, DOI: 10.1002/qj.3803.
31. Hipsey M. R., Bruce L. C., Boon C. et al., A General Lake Model (GLM 3.0) for linking with high-frequency sensor data from the Global Lake Ecological Observatory Network (GLEON), *Geoscientific Model Development*, 2019, Vol. 12, No. 1, pp. 473–523, DOI: 10.5194/gmd-12-473-2019.
32. Hosoda K., Murakami H., Sakaida F., Kawamura H., Algorithm and validation of sea surface temperature observation using MODIS sensors aboard terra and aqua in the western North Pacific, *J. Oceanography*, 2007, Vol. 63, Iss. 2, pp. 267–280, DOI: 10.1007/s10872-007-0027-4.
33. Houska T., Kraft Ph., Chamorro-Chavez A., Breuer L., SPOTting model parameters using a ready-made python package, *PLoS ONE*, 2015, Vol. 10, No. 12, Article e0145180, DOI: 10.1371/journal.pone.0145180.
34. Iakunin M., Stepanenko V., Salgado R. et al., Numerical study of the seasonal thermal and gas regimes of the largest artificial reservoir in Western Europe using the LAKE 2.0 model, *Geoscientific Model Development*, 2020, Vol. 13, No. 8, pp. 3475–3488, DOI: 10.5194/gmd-13-3475-2020.
35. Justice C., Townshend J., Vermote E. et al., An overview of MODIS Land data processing and product status, *Remote Sensing of Environment*, 2002, Vol. 83, pp. 3–15, DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00084-6.
36. Ke L., Song C., Remotely sensed surface temperature variation of an inland saline lake over the central Qinghai–Tibet Plateau, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, Vol. 98, pp. 157–167, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.09.007.
37. Kraemer B. M., Mehner T., Adrian R., Reconciling the opposing effects of warming on phytoplankton biomass in 188 large lakes, *Scientific Reports*, 2017, Vol. 7, Article 10762, DOI: 10.1038/s41598-017-11167-3.
38. Layden A., MacCallum S. N., Merchant C. J., Determining lake surface water temperatures worldwide using a tuned one-dimensional lake model (FLake v.1), *Geoscientific Model Development*, 2016, Vol. 9, No. 6, pp. 2167–2189, DOI: 10.5194/gmd-9-2167-2016.
39. Le Moigne P., Colin J., Decharme B., Impact of lake surface temperatures simulated by the FLake scheme in the CNRM-CM5 climate model, *Tellus A*, 2016, Vol. 68, Article 31274, DOI: 10.3402/tellusa.v68.31274.
40. Lehner B., Döll P., Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands, *J. Hydrology*, 2004, Vol. 296, No. 1–4, pp. 1–22, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.03.028.
41. Lehner B., Anand M., Fluet-Chouinard E. et al., Mapping the world’s inland surface waters: An update to the Global Lakes and Wetlands Database (GLWD v2), *Earth System Science Data Discussions [preprint]*, 2024, DOI: 10.5194/essd-2024-204.
42. Ljungemyr P., Gustafsson N., Omstedt A., Parameterization of lake thermodynamics in a high-resolution weather forecasting model, *Tellus A*, 1996, Vol. 48, pp. 608–621, DOI: 10.1034/j.1600-0870.1996.t01-4-00002.x.
43. MacCallum S. N., Merchant C. J., Surface water temperature observations of large lakes by optimal estimation, *Canadian J. Remote Sensing*, 2012, Vol. 38, Iss. 1, pp. 25–45, DOI: 10.5589/m12-010.
44. Mao K. B., Ma Y., Tan X. A. et al., Global surface temperature change analysis based on MODIS data in recent twelve years, *Advances in Space Research*, 2017, Vol. 59, No. 2, pp. 503–512, DOI: 10.1016/j.asr.2016.11.007.
45. Martynov A., Sushama L., Laprise R. et al., Interactive lakes in the Canadian Regional Climate Model, version 5: The role of lakes in the regional climate of North America, *Tellus A*, 2012, Vol. 64, Article 16226, DOI: 10.3402/tellusa.v64i0.16226.
46. Mironov D., Heise E., Kourzeneva E. et al., Implementation of the lake parameterisation scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO, *Boreal Environment Research*, 2010, Vol. 15, pp. 218–230.
47. Moukomla S., Blanken P., Remote sensing of the North American Laurentian Great Lakes’ surface temperature, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, Iss. 4, Article 286, DOI: 10.3390/rs8040286.
48. Phillips R. C., Saylor J. R., Kaye N. B., Gibert J. M., A multi-lake study of seasonal variation in lake surface evaporation using MODIS satellite-derived surface temperature, *Limnology*, 2016, Vol. 17, Iss. 3, pp. 273–289, DOI: 10.1007/s10201-016-0481-z.
49. Poole H. H., Atkins W. R. G., Photo-electric measurements of submarine illumination throughout the year, *J. Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1929, Vol. 16, No. 1, pp. 297–324, DOI: 10.1017/S0025315400029829.

50. Rooney G. G., Bornemann J. F., The performance of FLake in the Met Office Unified Model, *Tellus A*, 2013, Vol. 65, Article 21363, DOI: 10.3402/tellusa.v65i0.21363.
51. Sharma S., Gray D. K., Read J. S. et al., A global database of lake surface temperatures collected by in situ and satellite methods from 1985–2009, *Scientific Data*, 2015, Vol. 2, Article 150008, DOI: 10.1038/sdata.2015.8.
52. Sobrino J. A., García-Monteiro S., Julien Y., An analysis of the lake surface water temperature evolution of the world's largest lakes during the years 2003–2020 using MODIS data, *Recent Advances in Remote Sensing*, 2024, <https://doi.org/10.62880/rars240001>.
53. Stepanenko V. M., Martynov A., Goyette S., Fang X., Perroud M., Mironov D., First steps of a Lake Model Intercomparison Project, *Boreal Environment Research*, 2010, Vol. 15, pp. 191–202.
54. Stepanenko V. M., Martynov A., Jöhnk K. D. et al., A one-dimensional model intercomparison study of thermal regime of a shallow, turbid midlatitude lake, *Geoscientific Model Development*, 2013, Vol. 6, No. 4, pp. 1337–1352, DOI: 10.5194/gmd-6-1337-2013.
55. Stepanenko V., Jöhnk K. D., Machulskaya E. et al., Simulation of surface energy fluxes and stratification of a small boreal lake by a set of one-dimensional models, *Tellus A*, 2014, Vol. 66, Article 21389, DOI: 10.3402/tellusa.v66.21389.
56. Stepanenko V., Mammarella I., Ojala A. et al., LAKE 2.0: A model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes, *Geoscientific Model Development*, 2016, Vol. 9, No. 5, pp. 1977–2006, DOI: 10.5194/gmd-9-1977-2016.
57. Stepanenko V. M., Repina I. A., Artamonov A. Y. et al., Mid-depth temperature maximum in an estuarine lake, *Environmental Research Letters*, 2018, Vol. 13, No. 3, Article 035006, DOI: 10.1088/1748-9326/aad75.
58. Stepanenko V. M., Valerio G., Pilotti M., Horizontal pressure gradient parameterization for one-dimensional lake models, *J. Advances in Modeling Earth Systems*, 2020, Article e21063, DOI: 10.1029/2019MS001906.
59. Subin Z. M., Murphy L. N., Li F. et al., Boreal lakes moderate seasonal and diurnal temperature variation and perturb atmospheric circulation: analyses in the Community Earth System Model 1 (CESM1), *Tellus A*, 2012, Vol. 64, Article 15639, DOI: 10.3402/tellusa.v64i0.15639.
60. Sun L., Ling T., Xu M., Lee X., improving a multilevel turbulence closure model for a shallow lake in comparison with other 1-D models, *J. Advances in Modeling Earth Systems*, 2020, Vol. 12, No. 7, Article e2019MS001971, DOI: 10.1029/2019MS001971.
61. Thiery W., Stepanenko V. M., Fang X. et al., LakeMIP Kivu: evaluating the representation of a large, deep tropical lake by a set of one-dimensional lake models, *Tellus A*, 2014, Vol. 66, Article 21390, DOI: 10.3402/tellusa.v66.21390.
62. Thiery W., Davin E. L., Seneviratne S. I. et al., Hazardous thunderstorm intensification over Lake Victoria, *Nature Communications*, 2016, Vol. 7, Article 12786, DOI: 10.1038/ncomms12786.
63. Toptunova O., Choulga M., Kurzeneva E., Status and progress in global lake database developments, *Advances in Science and Research*, 2019, Vol. 16, pp. 57–61, DOI: 10.5194/asr-16-57-2019.
64. Turuncoglu U. U., Elguindi N., Giorgi F. et al., Development and validation of a regional coupled atmosphere lake model for the Caspian Sea Basin, *Climate Dynamics*, 2013, Vol. 41, No. 7–8, pp. 1731–1748, DOI: 10.1007/s00382-012-1623-6.
65. Xie C., Zhang X., Zhuang L. et al., Analysis of surface temperature variation of lakes in China using MODIS land surface temperature data, *Scientific Reports*, 2022, Vol. 12, No. 1, Article 2415, DOI: 10.1038/s41598-022-06363-9.
66. Zhang G., Yao T., Xie H. et al., Estimating surface temperature changes of lakes in the Tibetan Plateau using MODIS LST data, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, Vol. 119, No. 14, pp. 8552–8567, DOI: 10.1002/2014JD021615.
67. Zhang Q., Jin J., Wang X. et al., Improving lake mixing process simulations in the Community Land Model by using K-profile parameterization, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, Vol. 23, No. 12, pp. 4969–4982, DOI: 10.5194/hess-23-4969-2019.
68. Zhong Y., Notaro M., Vavrus S. J., Spatially variable warming of the Laurentian Great Lakes: An interaction of bathymetry and climate, *Climate Dynamics*, 2019, Vol. 52, No. 9–10, pp. 5833–5848, DOI: 10.1007/s00382-018-4481-z.