

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 556.555.4:556.072

ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОДНОМЕРНОЙ МОДЕЛИ ОЗЕРА К ВХОДНЫМ ДАННЫМ

М.А. Терешина¹, О.Н. Ерина², Д.И. Соколов³

^{1–3} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши*

¹ *Инженер; e-mail: martereshina@yandex.ru*

² *Зав. лабораторией, канд. геогр. наук; e-mail: oxana.erina@geogr.msu.ru*

³ *Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: dmitriy.sokolov@yandex.ru*

В работе рассматривается, насколько на адекватную работу модели термо- и гидродинамики озера влияет выбор источника метеорологических данных, используемых в качестве граничных условий, и изменение модельных калибровочных параметров. Приведены количественные оценки качества воспроизведения температурного режима малого озера одномерной моделью GLM при использовании данных автоматической метеостанции на берегу озера, государственной метеостанции и двух глобальных реанализов. Показано, что наилучшего результата моделирования (среднеквадратическая ошибка расчета температуры воды 0,8–2,0°C, критерий Нэша-Сатклифа >0,7) удастся достичь при использовании массивов данных, включающих прямое задание приходящих потоков коротковолновой и длинноволновой радиации. При этом для хорошего качества воспроизведения режима придонной температуры воды требуется правильное задание ветрового режима, возможное только при использовании данных инструментальных наземных наблюдений на стационарной метеостанции. Совмещение данных наземных наблюдений за скоростью ветра, температурой и влажностью воздуха с потоками радиации по данным глобальных реанализов позволяет достичь ошибки расчета $\leq 1^\circ\text{C}$ на всех глубинах.

Анализ чувствительности модели к калибровочным параметрам при использовании данных реанализа показал, что наибольшее влияние на итоговую ошибку расчета оказывают параметры, связанные с ветровым перемешиванием – поправочный коэффициент к скорости ветра и константы, связанные с внутримодельным описанием энергии ветрового воздействия. Изменение в ходе калибровки модельных констант интенсивности других типов перемешивания не приводит к направленному изменению количественных оценок качества моделирования. Целесообразным может быть также введение поправочных множителей к температуре воздуха и потокам солнечной радиации, которые могут скорректировать влияние нерепрезентативности используемых метеорологических данных для конкретного водоема, а также небольшая корректировка значения коэффициента экстинкции солнечной радиации относительно значения, полученного по прозрачности по диску Секки. Полученные результаты могут быть использованы для обоснования выбора источника метеорологических данных и оптимизации методик калибровки моделей термической стратификации водоемов.

Ключевые слова: лимнологическое моделирование, модель GLM, термический режим, источники метеорологических данных

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.6

ВВЕДЕНИЕ

Водный и термический режимы водоемов являются основой функционирования их экосистем, в связи с чем их изучению посвящено большое количество исследований на основе как обобщений натурных данных, так и использования математических моделей [Ефремова и др., 2016; Здоровеннова и др., 2016; Основные..., 2021; Golub et al., 2019; Woolway et al., 2021]. Лимнологическое моделиро-

вание сегодня является незаменимым инструментом, позволяющим расширить представление о текущем состоянии и режиме водоемов и получить их прогнозные оценки при различных климатических и антропогенных воздействиях. Надежно откалиброванные и верифицированные модели тепло- и массопереноса являются необходимым базисом и при разработке любых экологических моделей озер [Меншуткин и др., 2013].

Любая модель водоема, даже ограничивающаяся воспроизведением его термогидродинамики, неизбежно включает в себя ряд неточностей и допущений, связанных с различными факторами. К основным источникам неопределенности в моделях озерных систем относятся неточность измеренных гидрометеорологических показателей, используемых в качестве граничных условий и материала для калибровки и верификации модели, и неполнота описания реальных процессов тепло- и массообмена в конкретной модели [Эдельштейн, Даценко, 1998; Li et al., 2015]. Ошибки, вносимые за счет выбора входных данных и структуры модели, в свою очередь приводят к снижению устойчивости любых модельных расчетов и получаемых прогнозных оценок [Wynne et al., 2023]. Поэтому важной задачей при работе с лимнологическими моделями является минимизация этих ошибок путем выбора наилучших из доступных источников данных.

Одномерные модели, требующие сравнительно небольшого объема натурных измерений и малых вычислительных мощностей, получили широкое распространение при изучении водоемов различных размеров [Stepanenko et al., 2010; Kirillin et al., 2011; Mesman et al., 2020]. При этом одномерная схематизация подразумевает сильное упрощение реальных физических процессов, по-разному реализуемое за счет использования различных расчетных схем, включающих в том числе и эмпирические коэффициенты [Petrou et al., 2009], еще более снижающие определенность расчетов.

Отнести те или иные ошибки в работе модели к конкретному источнику неопределенности – сложная задача, реализуемая только при наличии достоверных данных наблюдений [Гладских и др., 2017; Rueda et al., 2009]. Поэтому во многих работах выводы о причинах неудовлетворительной сходимости результатов моделирования с натурными данными делаются умозрительно, без возможности выделения определенного источника ошибок на основе фактических данных.

Целью данной работы стала оценка чувствительности одномерной озерной термогидродинамической модели GLM (General Lake Model) к изменению как входных метеорологических данных, так и внутримодельных калибровочных параметров. Модель GLM разработана в Университете Западной Австралии в 2012 г. [Bruce et al., 2014] и в настоящее время является одной из наиболее широко используемых одномерных озерных моделей в мире. Использование различных доступных источников климатических данных – от прибрежной автоматической метеостанции до глобального реанализа погоды – и длительного ряда непрерывных наблюдений за температурой воды в малом озере должно

позволить получить представление о том, насколько возможно избежать существенных ошибок моделирования путем оптимизации самой модели и выбора определенного типа исходных гидрометеорологических данных.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Модель GLM. Все расчеты проводились в одномерной модели водного баланса и стратификации озер GLM. Данная модель воспроизводит изменение вертикального температурного профиля путем расчета потенциальной и кинетической энергии для однородных по плотности слоев, не привязанных к регулярной вертикальной сетке, т. е. применяет подход Лагранжа к моделированию движения среды. В модели учитываются поверхностный теплообмен, конвективное и ветровое перемешивание, воздействие притоков и оттока воды, теплообмен с дном и ледовые явления. В настоящей работе использовался шаг расчета один сутки. Уравнение энергетического баланса для поверхностного однородного слоя модели описывается уравнением

$$\frac{c_p}{A_s z_{sml}} \frac{dT_s}{dt} = \phi_{SW} - \phi_E + \phi_H + \phi_{LW_{in}} - \phi_{LW_{out}}, \quad (1)$$

где c_p – удельная теплоемкость воздуха (1005 Дж/(кг·К)), A_s и z_{sml} – площадь водной поверхности и толщина верхнего перемешанного слоя, dT_s/dt – изменение температуры поверхности воды, ϕ_{SW} , $\phi_{LW_{in}}$ и $\phi_{LW_{out}}$ – потоки приходящей коротковолновой радиации, длинноволнового излучения атмосферы и собственного теплового излучения озера, ϕ_E и ϕ_H – потоки скрытого и явного тепла, рассчитываемые по аэродинамическим балк-формулам. Скорость заглубления перемешанного слоя dz_{sml}/dt определяется путем сопоставления доступной кинетической (ТКЕ) и потенциальной (РЕ) энергии слоя, рассчитываемым по уравнениям (2) и (3):

$$\begin{aligned} \text{ТКЕ} = & \left\{ 0,5 C_K w_*^3 \Delta t \right\}_{[1]} + \left\{ 0,5 C_K C_W u_*^3 \Delta t \right\}_{[2]} + \\ & + \left\{ 0,5 C_S \left(u_b^2 + \frac{u_b^2}{6} \frac{d\xi}{dz_{sml}} + \frac{u_b \xi}{3} \frac{du_b}{dz_{sml}} \right) \right\}_{[3]} \Delta z_{k-1}, \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{РЕ} = & \left[\left\{ 0,5 C_T (w_*^3 + C_W u_*^3)^{2/3} \right\}_{[4]} + \left\{ \frac{\Delta p}{\rho_0} g z_{sml} \right\}_{[5]} + \right. \\ & \left. + \left\{ \frac{g \xi^2}{24 \rho_0} \frac{d(\Delta p)}{dz_{sml}} + \frac{g \xi \Delta p}{12 \rho_0} \frac{d\xi}{dz_{sml}} \right\}_{[6]} \right] \Delta z_{k-1}, \quad (3) \end{aligned}$$

где компоненты в расчете кинетической энергии соответствуют вкладу конвективного (1) и ветрового (2) перемешивания и образования трения между слоями и неустойчивости Кельвина–Гельм-

гольца (3), а компоненты в расчете потенциальной энергии – вкладу динамического ускорения (4), гидростатического подъема (5) и устранения неустойчивости Кельвина–Гельмгольца (6). C_K, C_W, C_S, C_T являются константами интенсивности разных типов перемешивания; u_* и w_* – эффективная скорость верхнего перемешанного слоя в горизонтальном и вертикальном направлениях; u_b – сдвиг скорости на границе перемешанного слоя, ξ – масштаб длины волн Кельвина–Гельмгольца; z_{k-1} – отметка нижней границы верхнего перемешанного слоя; ρ и ρ_0 – плотности воды и воздуха. Более подробно уравнения модели описаны в руководстве по использованию модели [Hipsey et al., 2014].

Морфометрические особенности водоема в модели учитываются путем задания кривой площадей. Для учета внешнего водного баланса необходимо задание ежесуточных расходов воды притоков и оттока воды из водоема. К метеорологическим данным, необходимым в качестве граничных условий, относятся температура и относительная влажность воздуха, скорость ветра, сумма атмосферных осадков и данные о приходящей коротковолновой солнечной радиации и длинноволновом излучении атмосферы. При отсутствии актинометрических наблюдений возможен внутримодельный расчет хода

коротковолновой радиации по модели безоблачного неба и данным об общей облачности, а также расчет длинноволновой радиации по ходу температуры и влажности воздуха и облачности.

В структуру модели входит ряд изменяемых параметров, которые могут использоваться для ручной или автоматической калибровки. К ним относятся коэффициент экстинкции фотосинтетически активной радиации (ФАР) K_W , константы интенсивности различных типов перемешивания (конвективного, ветрового и др.) и поправочные множители к метеорологическим параметрам, позволяющие в некоторой мере компенсировать нерепрезентативность используемых климатических данных. Рассмотренные в настоящей работе параметры модели приведены в таблице 1. Все они являются эмпирическими, границы изменения их значений в ходе калибровки и анализа чувствительности были приняты таким образом, чтобы охватить весь диапазон их изменчивости, обобщенный создателями модели по результатам обзора литературы [Hipsey et al., 2014]. Для коэффициента K_W было принято начальное значение 0,5 и пределы изменчивости от 0,01 до 2, исходя из данных об измеренной прозрачности воды за период наблюдений.

Таблица 1

Основные калибровочные параметры модели GLM на объектах исследования

Название параметра в файлах модели	Физический смысл параметра	Значение параметра по умолчанию	Принятый в работе диапазон изменения
K_W	Коэффициент экстинкции фотосинтетически активной радиации	–	0,01–2
Коэффициенты перемешивания и теплопереноса			
$coef_mix_conv$	Константы интенсивности: – конвективного перемешивания	0,2	0,01–1
$coef_wind_stir$	– ветрового перемешивания	0,23	0,01–1
$coef_mix_shear$	– трения между слоями	0,3	0,01–1
$coef_mix_turb$	– нестационарной турбулентности	0,51	0,01–1
$coef_mix_kh$	– образования волн Кельвина–Гельмгольца	0,3	0,01–1
$coef_mix_hyp$	– перемешивания в гипolimнионе	0,5	0,01–1
ce	Коэффициент влагообмена	0,0013	0,0001–0,003
ch	Коэффициент теплообмена	0,0013	0,0001–0,003
cd	Коэффициент ветрового сопротивления	0,0013	0,0001–0,003
Поправочные множители к метеорологическим параметрам			
$wind_factor$	– к скорости ветра	1	0,1–2
sw_factor	– к коротковолновой радиации	1	0,1–2
lw_factor	– к длинноволновой радиации	1	0,1–2
at_factor	– к температуре воздуха	1	0,1–2
rh_factor	– к относительной влажности	1	0,1–2
$rain_factor$	– к суммам осадков	1	0,1–2

Объект исследования. В качестве модельного водоема было выбрано озеро Глубокое (55,7530° с. ш. 36,5043° в. д.) – небольшой естественный водоем, расположенный на западе Московской области (рис. 1). Озеро имеет площадь поверхности 0,6 км² и максимальную глубину около 30 м, не имеет русловых притоков, внутригодовые колебания уровня воды не превышают 0,5 м. По трофическому статусу озеро Глубокое относится к мезотрофному типу, характеризуется пониженным содержанием растворенных веществ, что исключает существенное влияние минерализации и биоты на плотность воды и режим перемешивания. В течение около пяти месяцев в году в озере устанавливается устойчивая прямая температурная стратификация. В период с мая 2018 г. по ноябрь 2022 г. в наиболее глубоководной части озера действовала буйковая станция с автоматическими датчиками Onset HOBO Pendant, ежедневно фиксирующими температуру воды на глубинах 0,5, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 20 и 26 м. Цепь с логгерами обычно устанавливали только в безледный период, за исключением зимы 2020–2021 гг. (табл. 2). Таким образом, были получены ежесуточные вертикальные профили температуры воды для пяти летних сезонов, охватывающих, как правило, весь период от начала формирования до разрушения прямой температурной стратификации, и одной зимы.

Таблица 2

Используемые источники данных для калибровки и верификации модели

Источник данных	Продолжительность наблюдений, дата
Логгеры температуры воды	14.05.2018–01.11.2018 26.04.2019–15.11.2019 11.07.2020–23.05.2021 15.06.2021–14.11.2021 04.05.2022–04.11.2022
АМС на оз. Глубоком	22.10.2017–16.06.2019
М/ст. Можайск	22.10.2017–31.12.2022
Реанализ NCEP/DOE	22.10.2017–31.12.2022
Реанализ 20CRv3-ERA5	22.10.2017–31.12.2021

Источники метеорологических данных. Для оценки влияния метеорологических данных, используемых в качестве модельного форсинга, на качество воспроизведения термического режима озера были выбраны несколько источников информации. Первый из них – автоматическая метеостанция, установленная на берегу озера менее чем в 100 м от уреза воды и оснащенная датчиками температуры и влажности воздуха, скорости ветра, количества жидких осадков и приходящей коротковолновой радиации. Второй источник данных – государственная метео-

станция в г. Можайск (примерно в 40 км к юго-западу от озера), наблюдения на которой включают в себя инструментальные измерения температуры и влажности воздуха, скорости ветра, количества атмосферных осадков и балла облачности. Третий и четвертый источники данных – глобальные атмосферные реанализы, предоставляющие все необходимые данные, включая потоки приходящей на поверхность земли коротковолновой и длинноволновой радиации, рассчитанные по регулярной сетке географических координат: NCEP/DOE Reanalysis II (пространственное разрешение 1,905×1,875°) и 20CRv3-ERA5 (пространственное разрешение 0,6×0,6°). Выбранные реанализы находятся в открытом доступе, реанализы NCEP [Kanamitsu et al., 2002] и ERA5 [Hersbach et al., 2020] являются наиболее используемыми в мире, а комбинация 20CRv3-ERA5 [Compo et al., 2011; Slivinski et al., 2019] используется в качестве форсинга за исторический период в работах проекта ISIMIP. Данные реанализов были пересчитаны к географическим координатам озера путем линейной интерполяции между ближайшими узлами сетки.

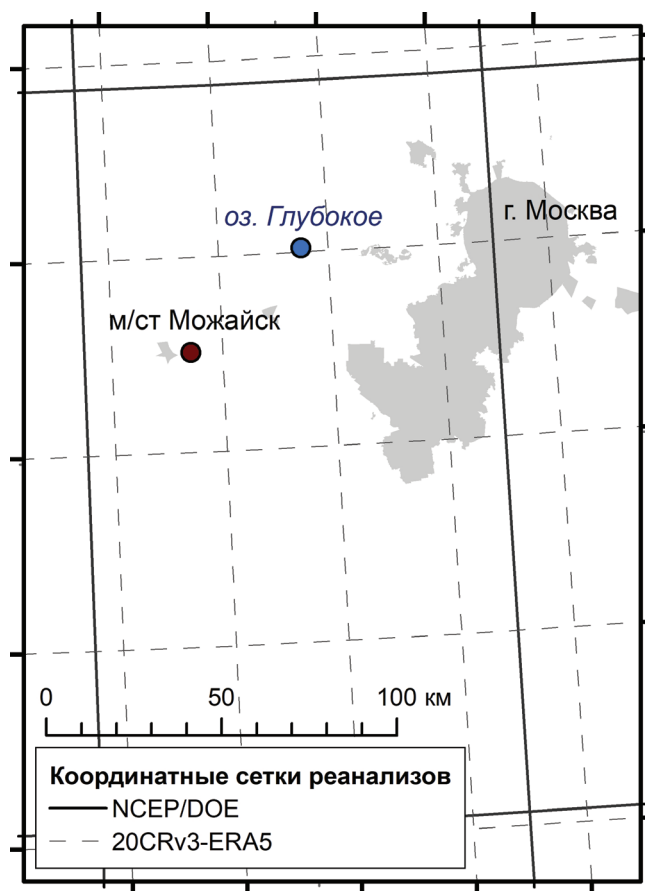


Рис. 1. Расположение оз. Глубокое и пространственная привязка основных используемых источников метеоданных

Fig. 1. Location of the Lake Glubokoe and spatial reference of the main meteorological data sources in use

Оценка чувствительности модели к входным данным и калибровочным параметрам. На первом этапе работы была оценена эффективность адаптации модели к условиям озера в зависимости от используемого набора входных метеорологических данных. Для этого было подготовлено несколько массивов граничных условий: четыре исходных ряда, относящихся к каждому из исходных источников метеоданных, а также пять дополнительных рядов на основе данных наземных метеостанций, дополненных информацией о приходящей солнечной радиации из реанализов либо данными об облачности.

Для каждого из полученных рядов метеоданных была произведена автоматическая калибровка модели методом случайного поиска, реализованная в пакетах *glmtools* и *FME* на языке программирования R. Калибровка проводилась по периоду, охваченному данными всех четырех источников: с 22 октября 2017 г. (осенняя гомотермия) до 16 июня 2019 г. (окончание работы автоматической метеостанции). Для вариантов калибровки, не основанных на данных автоматической метеостанции, также проводилась верификация на оставшемся периоде наблюдений. Использовалось несколько вариантов калибровки: в самом простом случае изменялась только величина $K_{\text{пр}}$ в последующих вариантах к ней последовательно добавлялись также поправки к метеоданным и внутримодельные коэффициенты перемешивания (см. табл. 1).

По результатам калибровки и верификации оценивались количественные характеристики качества моделирования: среднеквадратическая ошибка расчета температуры воды (RMSE) и критерий Нэша-Сатклиффа (NSE):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (T_{\text{факт}} - T_{\text{мод}})^2}{n}}, \quad (4)$$

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum (T_{\text{факт}} - T_{\text{мод}})^2}{\sum (T_{\text{факт}} - \bar{T}_{\text{факт}})^2}, \quad (5)$$

где $T_{\text{факт}}$ – измеренная температура воды, $T_{\text{мод}}$ – рассчитанная в модели температура воды, n – длина ряда. Наилучшему качеству моделирования соответствуют низкие значения RMSE и наивысшие значения NSE. В качестве критерия хорошего качества моделирования было принято значение $\text{NSE} \geq 0,70$ [Moriasi et al., 2007].

После выбора наилучшего из источников метеоданных была проведена количественная оценка чувствительности модели к калибровочным параметрам. Для этого была выбрана модель, адаптированная к озеру на основе оптимального массива

метеоданных, после чего значения всех калибровочных параметров по очереди изменялись в назначенных пределах (см. табл. 1) и фиксировалось изменение ошибок расчета.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Различия между массивами метеорологических данных. Все массивы данных в целом адекватно описывают ход метеорологических параметров в течение выбранного периода, однако между ними могут возникать существенные различия (табл. 3). Наибольшая сходимость между рядами отмечается для температуры воздуха, ход которой повторяется во всех массивах данных почти идентично: расхождение между разными источниками в 47% случаев находится в пределах $\pm 1^\circ\text{C}$, среднее расхождение между рядами составляет $0,2\text{--}0,6^\circ\text{C}$, хотя максимальное достигает $7\text{--}12^\circ\text{C}$.

Сезонные и синоптические циклы коротковолновой радиации также имеют высокую сходимость между тремя доступными источниками, хотя средние значения ее потока заметно отличаются: по данным автоматической метеостанции на земную поверхность за рассматриваемый период поступало в среднем 94 Вт/м^2 , по данным реанализа 20CRv3-ERA5 – 114 Вт/м^2 , по данным NCEP/DOE – 145 Вт/м^2 . Это может быть связано в случае метеостанции – с ее затенением растительностью, а в случае реанализов – с осреднением по достаточно грубой сетке координат. Меньшие различия отмечаются между оценками потоков длинноволнового излучения атмосферы по данным двух реанализов – средние их величины за период расчета составили 297 и 274 Вт/м^2 для реанализов 20CRv3-ERA5 и NCEP/DOE соответственно. Измерения относительной влажности по датчику автоматической метеостанции характеризуются заметно меньшим разбросом значений, чем показания метеостанции г. Можайска и реанализов, а реанализ NCEP/DOE завышает значения влажности по сравнению с другими источниками в зимне-весенний период. Все эти показатели определяют большую часть внешнего теплообмена водоема [Остроумова и др., 2009], вследствие чего описанные различия влияют на результат модельного расчета, в первую очередь – на температурный режим поверхностного слоя и среднюю температуру воды в водоеме.

Скорости ветра, играющие решающую роль при расчете интенсивности динамического перемешивания [Гречушникова, 2004], во многих случаях имеют различный синоптический ход по разным использованным источникам данных, а также обнаруживают систематические расхождения. Так, средняя скорость ветра по данным автоматической метеостанции за период наблюдений составляла $0,6 \text{ м/с}$, по

данным метеостанции в г. Можайск за тот же период – 2,1 м/с, по данным реанализа 20CRv3-ERA5 – 3,5 м/с, реанализа NCEP/DOE – 5,4 м/с. Расхождения в величинах и динамике скорости ветра влияют на качество воспроизведения глубины термоклина и

температурного режима поверхностного и среднего слоев водной толщи в летний период, а также определяют продолжительность периодов весеннего и осеннего перемешивания и температуру придонного слоя в начале установления стратификации.

Таблица 3

**Коэффициенты парной корреляции между рядами характеристик
из различных источников метеорологических данных**

	Температура воздуха			Скорость ветра			Относительная влажность			Коротковолновая радиация		Длинноволновая радиация
	Глубокое	Можайск	20CRv3-ERA5	Глубокое	Можайск	20CRv3-ERA5	Глубокое	Можайск	20CRv3-ERA5	Глубокое	20CRv3-ERA5	20CRv3-ERA5
Можайск	0,99			0,59			0,86			–		
20CRv3-ERA5	0,98	1,00		0,49	0,84		0,84	0,96		0,91		
NCEP/DOE	0,98	0,99	0,99	0,47	0,82	0,93	0,60	0,66	0,63	0,89	0,95	0,91

Влияние используемых метеоданных на качество моделирования. Калибровка модели с использованием разных массивов метеорологических данных в качестве форсинга показала широкий разброс качества моделирования (табл. 4, рис. 2). Среди четырех исходных рядов метеоданных наихудший результат получен при расчетах с использованием данных автоматической метеостанции на оз. Глубокое: при вариантах калибровки, не корректирующих никакие метеопараметры, кроме скорости ветра, среднеквадратическая ошибка расчета температуры воды по этому источнику метеоданных составляет до 3,8–7,7°C, значение критерий Нэша-Сатклиффа не превышает 0,6. Хорошего результата калибровки (RMSE 1,7–2,0°C, NSE > 0,9) удалось достичь только при введении поправок ко всем метеорологическим параметрам (в первую очередь – повышающих коэффициентов для скорости ветра и коротковолновой радиации и понижающего – для длинноволновой радиации). При этом воспроизведение поверхностной и придонной температуры воды оказывается неудовлетворительным (чаще всего с отрицательными величинами NSE), за счет чего данные автоматической метеостанции проигрывают остальным источникам даже при наиболее тщательной калибровке.

Данные метеостанции в г. Можайск позволяют более адекватно адаптировать модель к выбранному водоему, хотя в некоторых случаях ошибка расчета остается достаточно высокой: величина RMSE

по результатам валидации при всех вариантах калибровки составляет 1,9–4,7°C, величина NSE при оценке по всем горизонтам составляет 0,3 при калибровке только по $K_{\text{пр}}$ и превышает 0,7 во всех остальных случаях. Откалиброванная на данных метеостанции модель способна удовлетворительно воспроизвести ход поверхностной температуры, но существенно ошибается в определении глубины и градиента температуры в термокline, за счет чего сильно снижается качество моделирования в целом. Здесь также отмечаются отрицательные значения NSE при оценке качества воспроизведения придонной температуры воды.

Использование обоих реанализов позволяет достичь хорошего качества моделирования даже при минимальной калибровке, не затрагивающей метеорологические параметры: величина RMSE по всем горизонтам для этих массивов данных не превышает 2,7°C, оценка NSE для всех горизонтов, кроме придонного, всегда превышает 0,8, для поверхностного слоя – близка к 1. Несколько лучшего результата позволяет достичь расчет по данным реанализа 20CRv3-ERA5, что может быть связано с его более высоким пространственным разрешением, однако различия между этими источниками данных малы по сравнению с разницей с наземными наблюдениями. В то же время для придонного горизонта значений $\text{NSE} \geq 0,7$ удастся достичь только в некоторых случаях, хотя ошибка расчета придонной температуры часто не превышает 1°C).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что важное значение для расчета термического режима водоема имеет задание радиационного баланса его поверхности [Гречушникова, Эдельштейн, 2012]. Использование массивов данных с прямым заданием потоков приходящей солнечной радиации позволяет достичь наиболее высокой сходимости модельных расчетов с данными наблюдений. При этом актинометрические данные автоматической метеостанции требуют корректировки. В данном случае ключевой причиной нерепрезентативности величины приходящей радиации, фиксируемой метеостанцией, могут являться технические ошибки при ее установке

и эксплуатации: затенение датчиков окружающей растительностью, неправильное их расположение и отсутствие поддержания работоспособности в течение периода измерений. При этом погрешности актинометрических датчиков станции могут иметь переменный характер, в связи с чем их коррекция линейными методами может быть затруднительна. Поэтому при отсутствии возможности тщательного поддержания актинометрических датчиков в приемлемом состоянии предпочтительным представляется использование сеточных данных реанализов или климатических моделей даже при их грубом пространственном разрешении.

Таблица 4

Результаты верификации модели, откалиброванной по различным метеоданным

Источник метеоданных	Вариант калибровки					
	1	2	3	4	5	6
	Только K_w	K_w + скорость ветра	K_w + параметры перемешивания	K_w + скорость ветра + параметры перемешивания	K_w + все поправки к метеоданным	K_w + все поправки к метеоданным + параметры перемешивания
Глубокое*	<u>7,7</u> 9,8/0,8	<u>4,9</u> 4,9/4,3	<u>6,2</u> 13,0/0,7	<u>3,8</u> 8,0/0,7	<u>1,7</u> 2,8/0,6	<u>2,0</u> 3,5/0,6
Можайск	<u>4,7</u> 7,8/1,1	<u>3,0</u> 4,3/1,8	<u>2,4</u> 3,4/1,2	<u>2,1</u> 2,4/1,4	<u>2,3</u> 2,8/1,5	<u>1,9</u> 2,4/0,8
20CRv3-ERA5	<u>1,4</u> 1,3/1,2	<u>0,9</u> 1,0/0,6	<u>1,0</u> 1,0/0,8	<u>1,2</u> 1,2/0,7	<u>2,7</u> 1,5/1,3	<u>1,3</u> 1,4/0,8
NCEP/DOE	<u>2,0</u> 1,3/1,9	<u>1,6</u> 1,7/1,7	<u>1,4</u> 1,4/0,6	<u>1,4</u> 1,4/1,3	<u>1,3</u> 1,4/1,2	<u>1,6</u> 1,9/1,1
Глубокое + облачность*	<u>9,3</u> 26,0/1,0	<u>7,0</u> 17,0/0,6	<u>6,8</u> 18,0/0,8	<u>4,7</u> 12,0/0,4	<u>1,1</u> 1,8/0,1	<u>1,3</u> 2,3/0,6
Глубокое + д/в ERA*	<u>2,4</u> 4,3/0,6	<u>1,6</u> 2,4/0,7	<u>1,6</u> 2,6/0,6	<u>1,9</u> 2,1/0,7	<u>1,4</u> 2,4/0,6	<u>1,5</u> 2,4/0,2
Глубокое + д/в NCEP*	<u>3,1</u> 5,9/0,6	<u>2,5</u> 4,3/0,7	<u>2,6</u> 5,0/0,6	<u>2,8</u> 5,7/0,6	<u>1,8</u> 2,9/0,6	<u>1,9</u> 3,3/0,6
Можайск + к/в и д/в ERA	<u>1,4</u> 1,6/0,6	<u>0,9</u> 0,8/0,4	<u>1,1</u> 1,1/0,7	<u>0,8</u> 0,8/0,7	<u>2,0</u> 0,9/2,0	<u>1,2</u> 1,4/0,4
Можайск + к/в и д/в NCEP	<u>1,7</u> 2,6/0,5	<u>1,2</u> 1,5/0,8	<u>1,0</u> 1,0/0,8	<u>1,1</u> 1,1/1,2	<u>1,2</u> 1,1/1,0	<u>1,0</u> 0,9/0,6

Примечание. В числителе – величины RMSE (°C) по всем глубинам; в знаменателе – величины RMSE для поверхностного/придонного слоя; * – оценки приведены для периода калибровки (без верификации); д/в – длинноволновая; к/в – коротковолновая радиация.

Дополнение данных наземных измерений скорости ветра, температуры и влажности воздуха сведениями о радиационном режиме из реанализов в некоторых случаях позволяет немного снизить ошибку модели по сравнению с расчетами на основе исходных массивов данных. Так, совмещение измерений метеостанции в г. Можайске с радиационными данными реанализов позволяет снизить среднеквадра-

тическую ошибку расчета температуры воды на 3,0–3,3°C даже при минимальном наборе калибровочных параметров, а при калибровке по всем рассматриваемым параметрам ошибка снижается на 0,7°C относительно расчета только по данным метеостанции и на 0,1–0,6°C относительно реанализов. Существенное снижение RMSE (на 0,3–5,3°C) наблюдается и при дополнении измерений автоматической метеостан-

ции рядами длинноволнового излучения атмосферы. Такого же улучшения можно достичь, используя ряды облачности по данным метеостанции Можайск, но только при использовании всех доступных калибровочных параметров. Данные метеостанции Мо-

жайск, дополненные радиационными потоками из реанализов, позволяют также достичь наилучшего воспроизведения хода придонной температуры воды среди всех рассмотренных источников с величиной NSE, достигающей в некоторых случаях 0,9.

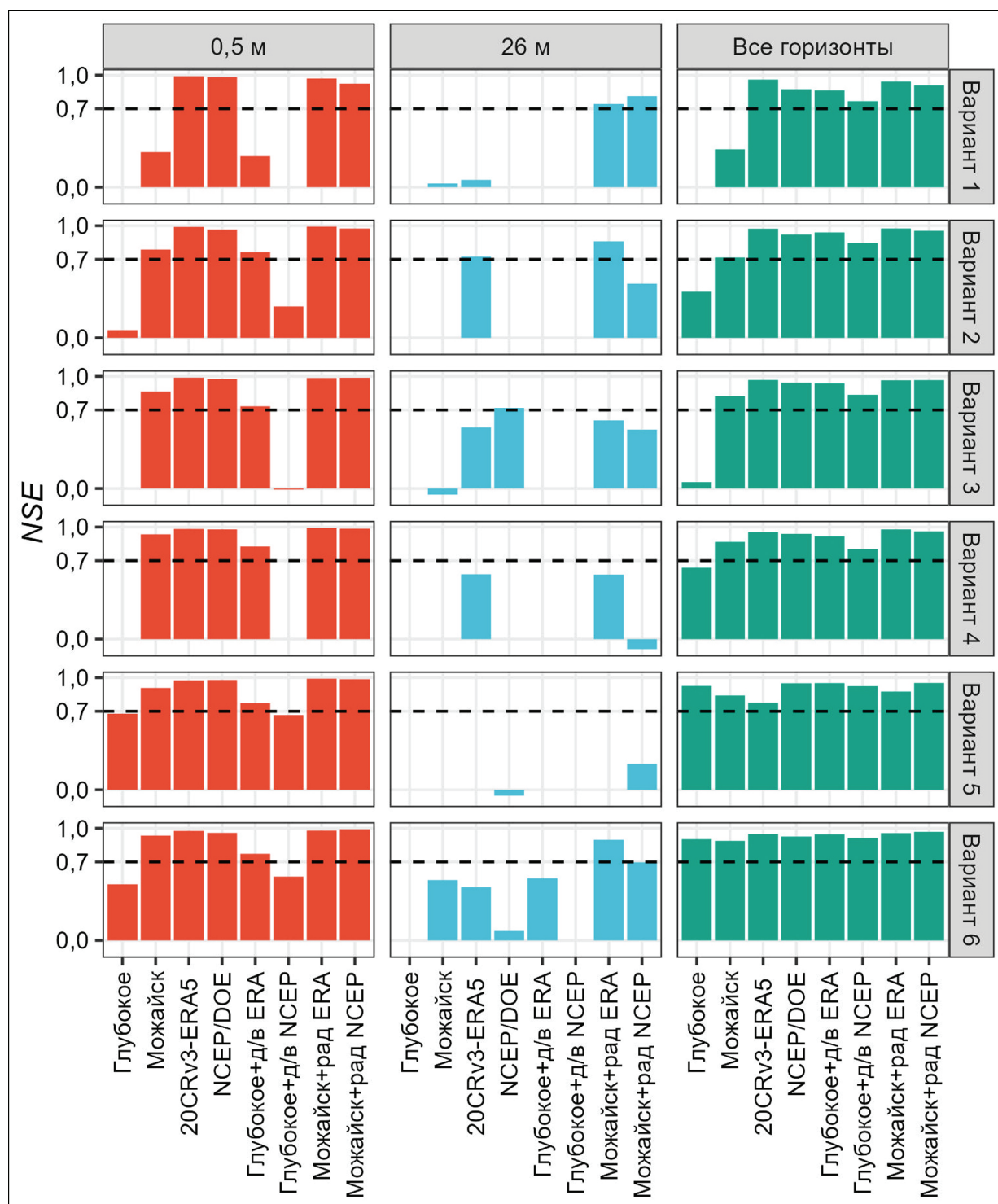


Рис. 2. Величина NSE по результатам верификации модели, адаптированной по разным вариантам калибровки (см. табл. 4) с использованием различных источников метеоданных

Fig. 2. NSE values (after verification of a model adapted using different calibration options (see tabl. 4) and different meteorological data sources)

По результатам анализа можно сделать вывод, что данные стационарных метеостанций, включающие актинометрические измерения либо дополненные информацией о солнечной радиации из других источников, в равнинных условиях оказываются наилучшим вариантом форсинга даже при существенной их удаленности от объекта моделирования (рис. 3).

В то же время использование реанализов в качестве метеофорсинга позволяет достичь незначительно худших, а иногда и лучших результатов даже при умеренной калибровке, отсутствии корректировки входных данных и существенных их расхождениях с измеренными на метеостанциях величинами скорости ветра, влажности воздуха и количества осадков.

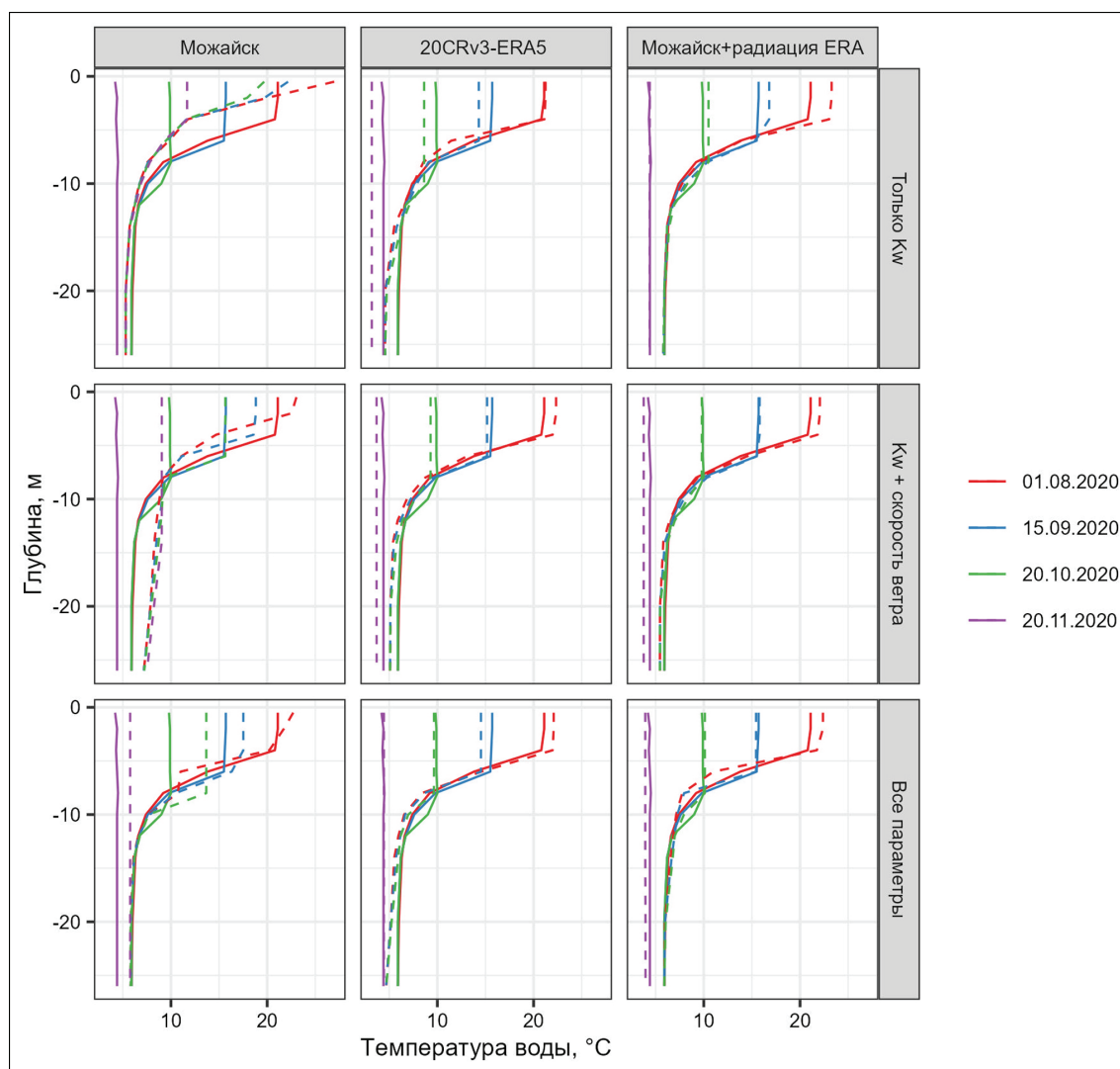


Рис. 3. Фактическое (сплошная линия) и модельное (пунктирная линия) распределение температуры воды в оз. Глубоком в различные фазы термического цикла по разным вариантам калибровки с использованием оптимальных массивов метеоданных

Fig. 3. Observed (solid line) and modeled (dashed line) distribution of water temperature Lake Glubokoe during different phases of the thermal cycle according to different calibration options using optimal meteorological data sources

Чувствительность модели к калибровочным параметрам. По результатам первого этапа работы для последующего анализа чувствительности модели к изменению калибровочных параметров был сделан выбор в пользу реанализа 20CRv3-ERA5 как оптимального источника метеорологических данных, не имеющего существенных расхождений с погодными условиями на акватории озера. Для анализа вклада

калибровочных параметров в изменение итоговой ошибки расчета за основу был выбран вариант конфигурации модели, откалиброванный только по значению K_w , имеющий среднеквадратическую ошибку расчета по полному периоду наблюдений $1,4^\circ\text{C}$.

При поочередном изменении каждого из 16 калибровочных параметров в границах, обозначенных ранее, выделяются группы параметров, в разной

степени определяющих качество расчета (рис. 4). Для многих из эмпирических параметров (константы эффективности всех видов перемешивания, кроме внутреннего трения, и коэффициент явного теплообмена ch), а также для поправочного множителя к количеству осадков не отмечается устой-

чивого снижения или увеличения ошибки расчета при отклонении от значений по умолчанию, и на всем диапазоне варьирования показателей ошибка отклоняется случайным образом в пределах $\pm 25\%$ от исходного значения. Калибровка модели по этим показателям наименее целесообразна.

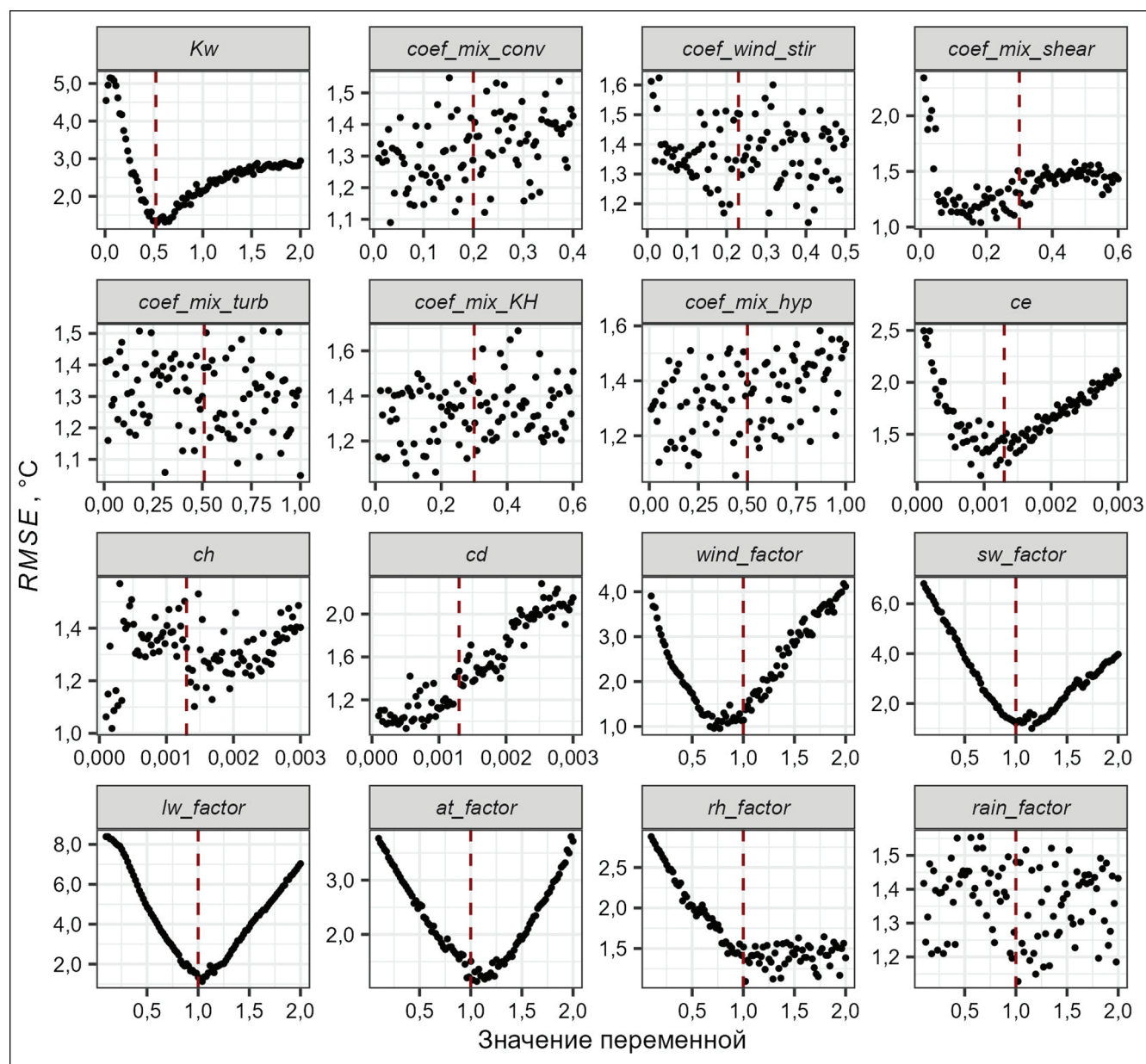


Рис. 4. Динамика ошибки модельного расчета при изменении калибровочных параметров в пределах выбранных диапазонов. Пунктирной линией показаны значения параметров по умолчанию

Fig. 4. Modeling error variation under the changes of calibration parameters within selected ranges. The dashed line shows the default values

Для параметра cd – коэффициента трения при касательном напряжении ветра – наблюдается тенденция к монотонному увеличению ошибки по мере роста значения показателя. В результате этого «оптимальное» значение достигается близко к

нижней границе диапазона его изменения в рамках анализа чувствительности. Минимальная достигнутая ошибка составила $0,93^{\circ}\text{C}$, т. е. примерно на 33% ниже исходной. Коэффициент ветрового трения cd участвует в расчете касательного напряжения, соз-

даваемого при ветровом воздействии, определяя перенос импульса между поверхностью раздела воздух–вода и далее вглубь водной толщи. Он принимается обычно близким к отношению плотностей воздуха и воды, однако его величина может изменяться в зависимости от скорости ветра. Снижение величины этого коэффициента позволяет более адекватно воспроизвести режим перемешивания в весенний и осенний периоды, увеличивая общую продолжительность летнего периода устойчивой стратификации. За счет этого уменьшается амплитуда колебаний температуры воды в гипolimнионе, которая при исходном значении параметра оказывалась завышенной. Ход поверхностной температуры воды при этом изменяется слабо.

К аналогичному результату – снижению ошибки до 0,96–1,04°C за счет более правильного воспроизведения периодов весеннего и осеннего перемешивания – приводит снижение коэффициента интенсивности перемешивания за счет образования трения сдвига (*coef_mix_shear*) или введение понижающего поправочного коэффициента к скорости ветра. Для обоих этих параметров в процессе калибровки выделены отчетливые оптимумы значений. При этом если изменение величины коэффициента *coef_mix_shear*, как и в случае *cd*, почти не влияет на динамику поверхностной температуры воды, то введение понижающей поправки к скорости ветра при схожем воздействии на температуру воды в гипolimнионе приводит к существенному снижению теплопотерь в поверхностном слое и увеличению температуры воды в эпилимнионе. Множители к скорости ветра, помогающие учесть эффект экранирования растительностью на небольших озерах или высокую длину ветрового разгона на больших озерах, используются в лимнологических моделях достаточно часто [Markfort et al., 2010]. Существуют также различные способы учета изменчивости величины коэффициента ветрового трения, хотя по натурным данным и модельным расчетам его значения изменяются в менее узких пределах, чем достигнутый в данной работе оптимум [Репина, 2007]. Таким образом, коэффициенты *cd*, *coef_mix_shear* и множитель к скорости ветра могут выполнять различные функции при калибровке, в связи с чем их совместное включение в алгоритмы оптимизации может быть эффективным.

Для нескольких параметров наблюдается наличие выраженного оптимума, слабо отклоняющегося от значений по умолчанию, при удалении в обе стороны от которого происходило резкое увеличение ошибки расчета. К ним относятся коэффициент экстинкции ФАР (K_w), коэффициент переноса скрытого тепла (*ce*) и поправочные множители к температуре воздуха, коротковолновой и длинноволновой

радиации. Величина K_w исходно была достаточно достоверно оценена по среднему значению прозрачности воды, дополнительная калибровка позволила лишь незначительно (менее чем на 0,1 °C) снизить ошибку расчета. Выделенное оптимальное значение коэффициента *ce* (0,00095, RMSE = 1,1°C) оказывается несколько ниже типичных, отмечаемых в литературе диапазонов [Репина, 2007], хотя его значения также могут изменяться в зависимости от скорости ветра и других факторов. Изменение величин температуры и влажности воздуха и интенсивности потоков коротко- и длинноволновой радиации в пределах $\pm 20\%$ от исходных значений позволило снизить ошибку расчета на 0,15–0,30°C. Соответствующие множители могут быть полезны в качестве калибровочных параметров при подозрении на нерепрезентативность метеорологических данных. Так, потоки коротковолновой радиации в использованных в данной работе массивах данных автоматической метеостанции и реанализа 20CRv3-ERA5 различались в среднем на 20%, что может быть скорректировано при помощи именно таких поправочных множителей.

ВЫВОДЫ

Данные автоматической метеостанции, ближайшей государственной метеостанции и реанализов для одного озера в пределах равнинной части ЕТР расходятся в средних величинах потоков коротковолновой солнечной радиации до полутора раз, в скоростях ветра – до 9 раз, что приводит к существенным различиям в оценках теплового баланса и доступной для динамического перемешивания кинетической энергии.

Прямое задание потоков коротковолновой и длинноволновой радиации по данным реанализов заметно улучшает воспроизведение термического режима озера. Измерения наземной метеостанции, совмещенные с реанализами солнечной радиации, позволяют достичь наилучшего результата моделирования и хорошего воспроизведения хода не только поверхностной, но и придонной температуры воды. Использование только данных реанализов также позволяет достичь высокого качества моделирования даже при минимальной калибровке, грубом пространственном разрешении и высоких расхождениях с наземными измерениями других метеорологических параметров.

Среди калибровочных параметров модели наибольшее влияние на итоговую ошибку расчета оказывают параметры, связанные с ветровым перемешиванием – поправочный коэффициент к скорости ветра и константы, связанные с внутримодельным описанием энергии ветрового воздействия, оптимальные значения которых могут заметно от-

клоняться от значений по умолчанию. Остальные эмпирические константы, входящие в формулы расчета различных видов перемешивания, почти не влияют на качество моделирования термического режима озера.

Включение в процесс калибровки коэффициента экстинкции ФАР позволяет скорректировать

неточности, связанные с оценкой его величины по прозрачности воды или измерениям подводной освещенности. Изменение величин поправочных множителей к метеорологическим параметрам (кроме скорости ветра) в небольших пределах может скорректировать нерепрезентативность выбранного источника метеорологических данных.

Благодарности. Подготовка статьи осуществлена в рамках НИР кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (госзадание № ЦИТИС 121051400038-1 «Анализ, моделирование и прогнозирование изменений гидрологических систем, водных ресурсов и качества вод суши»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гладских Д.С., Сергеев Д.А., Байдаков Г.А., Соустова И.А., Троицкая Ю.И. Численное моделирование температурной стратификации внутренних водоемов с использованием данных натурных измерений // Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы. 2017. С. 132–136.
- Гречушников М.Г. Роль конвективного и ветрового перемешивания в термической стратификации неглубокого водоема // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2004. № 2. С. 9–15.
- Гречушников М.Г., Эдельштейн К.К. Возможные изменения гидрологического режима Рыбинского водохранилища при потеплении климата // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2012. № 6. С. 61–67.
- Ефремова Т.В., Пальшин Н.И., Белаишев Б.З. Температура воды разнотипных озер Карелии в условиях изменения климата (по данным инструментальных измерений 1953–2011 гг.) // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 2. С. 228–238. DOI: 10.7868/S0321059616020024.
- Здоровеннова Г.Э., Шадрина А.А., Федорова И.В. Моделирование термического режима малых арктических озер // Успехи современного естествознания. 2016. № 1. С. 111–115.
- Менишуткин В.В., Руховец Л.А., Филатов Н.Н. Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор) 1. Гидродинамика озер // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 6. С. 566–582. DOI: 10.7868/S0321059613060096.
- Основные гидрологические характеристики озер Российской Федерации и их многолетние изменения: научно-прикладной справочник. СПб.: РИАН, 2021. 364 с.
- Остроумова Л.П., Полонский В.Ф., Солодовникова Т.Ю. и др. Исследование составляющих теплового баланса Северного Каспия и Невской губы // Труды Государственного океанографического института. 2009. № 212. С. 123–145.
- Репина И.А. Методы определения турбулентных потоков над морской поверхностью. М.: ИКИ РАН, 2007. 36 с.
- Эдельштейн К.К., Даценко Ю.С. Лимнологическое моделирование. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 80 с.
- Bruce L.C., Frassl M.A., Arhonditsis G.B. et al. A multi-lake comparative analysis of the General Lake Model (GLM), Stress-testing across a global observatory network, *Environmental Modelling & Software*, 2018, vol. 102, p. 274–291.
- Compo G.P., Whitaker J.S., Sardeshmukh P.D. et al. The Twentieth Century Reanalysis Project, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, vol. 137, p. 1–28, DOI: 10.1002/qj.776.
- 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, p. 4597–4623, DOI: 10.5194/gmd-15-4597-2022.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, vol. 146, p. 1999–2049, DOI: 10.1002/qj.3803.
- Hipsey M.R., Bruce L.C., Hamilton D.P. GLM-General Lake Model: Model overview and user information, Perth (Australia), University of Western Australia, 2014, 42 p.
- Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J. et al. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2), *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, vol. 83, p. 1631–1643, DOI: 10.1175/BAMS-83-11-1631.
- Kirillin G., Hochschild J., Mironov D. et al. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage, *Environmental Modelling & Software*, 2011, vol. 26(5), p. 683–684, DOI: 10.1016/j.envsoft.2010.12.004.
- Li Y., Tang C., Zhu J. et al. Parametric uncertainty and sensitivity analysis of hydrodynamic processes for a large shallow freshwater lake, *Hydrological Sciences Journal*, 2015, vol. 60(6), p. 1078–1095, DOI: 10.1080/02626667.2014.948444.
- Markfort C.D., Perez A.L.S., Thill J.W. et al. Wind sheltering of a lake by a tree canopy or bluff topography, *Water Resources Research*, 2010, vol. 46, W03530, DOI: 10.1029/2009WR007759.
- Mesman J.P., Ayala A.I., Adrian R. et al. Performance of one-dimensional hydrodynamic lake models during short-term extreme weather events, *Environmental Modelling & Software*, 2020, vol. 133, p. 104852, DOI: 10.1016/j.envsoft.2020.104852.
- Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, *Transactions of the ASABE*, 2007, vol. 50(3), p. 885–900, DOI: 10.13031/2013.23153.
- Perroud M., Goyette S., Martynov A. et al. Simulation of multiannual thermal profiles in deep Lake Geneva: A comparison of one-dimensional lake models, *Limno-*

- logy and Oceanography, 2009, vol. 54(5), p. 1574–1594, DOI: 10.4319/lo.2009.54.5.1574.
- Rueda F., Vidal J., Schladow G. Modeling the effect of size reduction on the stratification of a large wind-driven lake using an uncertainty-based approach, *Water Resources Research*, 2009, vol. 45, W03411, DOI: 10.1029/2008WR006988.
- Slivinski L.C., Compo G.P., Whitaker J.S. et al. Towards a more reliable historical reanalysis: Improvements for version 3 of the Twentieth Century Reanalysis system, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2019, vol. 145, p. 2876–2908, DOI: 10.1002/qj.3598.
- Stepanenko V.M., Goyette S., Martynov A. et al. First steps of a lake model intercomparison project: LakeMIP, *Boreal Environment Research*, 2010, vol. 15, p. 191–202.
- Woolway R.I., Debolskiy A., Golub M. et al. Phenological shifts in lake stratification under climate change, *Nature Communications*, 2021, vol. 12, 2318, DOI: 10.1038/s41467-021-22657-4.
- Wynne J.H., Woelmer W., Moore T.N. et al. Uncertainty in projections of future lake thermal dynamics is differentially driven by lake and global climate models, *PeerJ*, 2023, vol. 11, e15445, DOI: 10.7717/peerj.15445.

Поступила в редакцию 30.07.2023

После доработки 10.11.2023

Принята к публикации 14.02.2024

SENSITIVITY OF A 1D LAKE MODEL TO THE INPUT METEOROLOGICAL DATA

M.A. Tereshina¹, O.N. Erina², D.I. Sokolov³

^{1–3} *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology*

¹ *Engineer; e-mail: martereshina@yandex.ru*

² *Head of Laboratory, Ph.D. in Geography; e-mail oxana.erina@geogr.msu.ru*

³ *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail dmitriy.sokolov@yandex.ru*

The paper evaluates how the choice of a source of meteorological data used as boundary conditions and the changes in model calibration parameters affect the adequate performance of a model of lake thermo- and hydrodynamics. The quality of simulation of water temperature dynamics in a small lake by a one-dimensional GLM model using data from an automatic meteorological station on the lake shore, a state weather station and two global reanalyses was quantitatively assessed. It is shown that the best modeling result (RMSE of water temperature calculation 0,8–2,0°C, Nash-Sutcliffe efficiency >0,7) can be achieved using data sets that explicitly provide incoming shortwave and longwave radiation fluxes. At the same time, good representation of the bottom water temperature requires correct setting of wind regime, which is only possible if data from instrumental ground-based observations at a stationary weather station are applied. Combining ground-based observations of wind speed, air temperature and humidity with radiation fluxes from global reanalyses makes it possible to achieve a calculation error ≤1°C at all depths.

The analysis of model sensitivity to calibration parameters in case when the reanalysis data are applied showed that parameters related to wind mixing, i.e. the scaling factor for wind speed and constants related to the in-model description of wind impact energy, have the greatest influence on the final calculation error. If we change the intensity coefficients of other types of mixing during calibration it does not lead to an obvious trend in the quantitative estimates of modeling quality. It could also be reasonable to introduce correction multipliers to the values of air temperature and solar radiation fluxes, thus neutralizing the effect of unrepresentativeness of the meteorological data applied for a particular lake, as well as to correct the value of solar radiation extinction coefficient relative to the value obtained from the Secchi depth. The results of the study could be used to justify the choice of meteorological data source and to optimize the methods of calibration of lake thermal stratification models.

Keywords: limnological modeling, GLM lake model, thermal regime, sources of meteorological data

Acknowledgments. The paper was prepared within the framework of research work of the Department of Land Hydrology, MSU Faculty of Geography (State task CITIS 121051400038-1 Analysis, modeling and forecast of changes in hydrological systems, water resources and terrestrial water quality).

REFERENCES

- Bruce L.C., Frassl M.A., Arhonditsis G.B. et al. A multi-lake comparative analysis of the General Lake Model (GLM): Stress-testing across a global observatory network, *Environmental Modelling & Software*, 2018, vol. 102, p. 274–291.
- Compo G.P., Whitaker J.S., Sardeshmukh P.D. et al. The Twentieth Century Reanalysis Project // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, vol. 137, p. 1–28, DOI: 10.1002/qj.776.

- Edel'shtein K.K., Datsenko Yu.S. *Limnologicheskoe modelirovanie* [Limnological modelling], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1998, 80 p. (In Russian)
- Efremova T.V., Pal'shin N.I., Belashev B.Z. Water temperature in different types of lakes in Karelia under changing climate based on data of instrumental measurements in 1953–2011, *Water Resources*, 2016, vol. 43, no. 2, p. 228, DOI 10.7868/S0321059616020024. (In Russian)
- Gladskikh D.S., Sergeev D.A., Baidakov G.A., Soustova I.A., Troitskaya Yu.I. [Numerical modeling of temperature stratification of inland water bodies using data of field measurements], *Gidrometeorologiya i ekologiya: nauchnye i obrazovatel'nye dostizheniya i perspektivy* [Hydrometeorology and ecology: scientific and educational achievements and prospects], 2017, p. 132–136. (In Russian)
- 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, p. 4597–4623, DOI: 10.5194/gmd-15-4597-2022.
- Grechushnikova M.G. Rol' konvektivnogo i vetrovogo peremeshivaniya v termicheskoi stratifikatsii neglubokogo vodoema [The role of convective and wind mixing in the thermal stratification of a shallow reservoir], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2004, no. 2, p. 9–15. (In Russian)
- Grechushnikova M.G., Edelshtein K.K. Vozmozhnye izmeneniya gidrologicheskogo rezhima Rybinskogo vodokhranilishcha pri poteplenii klimata [Possible changes of the Rybinsk Reservoir hydrological regime under climate warming], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2012, no. 6, p. 61–67. (In Russian)
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, vol. 146, p. 1999–2049, DOI: 10.1002/qj.3803.
- Hipsey M.R., Bruce L.C., Hamilton D.P. *GLM-General Lake Model, Model overview and user information*, Perth (Australia), University of Western Australia, 2014, 42 p.
- Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J. et al. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2), *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, vol. 83, p. 1631–1643, DOI: 10.1175/BAMS-83-11-1631.
- Kirillin G., Hochschild J., Mironov D. et al. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage, *Environmental Modelling & Software*, 2011, vol. 26(5), p. 683–684, DOI: 10.1016/j.envsoft.2010.12.004.
- Li Y., Tang C., Zhu J. et al. Parametric uncertainty and sensitivity analysis of hydrodynamic processes for a large shallow freshwater lake, *Hydrological Sciences Journal*, 2015, vol. 60(6), p. 1078–1095, DOI: 10.1080/02626667.2014.948444.
- Markfort C.D., Perez A.L.S., Thill J.W. et al. Wind sheltering of a lake by a tree canopy or bluff topography, *Water Resources Research*, 2010, vol. 46, W03530, DOI: 10.1029/2009WR007759.
- Menshutkin V.V., Rukhovets L.A., Filatov N.N. Ecosystem modeling of freshwater lakes (review) 1. Hydrodynamics of lakes, *Water Resources*, 2013, vol. 40, no. 6, p. 566–582, DOI:10.7868/S0321059613060096 (In Russian)
- Mesman J.P., Ayala A.I., Adrian R. et al. Performance of one-dimensional hydrodynamic lake models during short-term extreme weather events, *Environmental Modelling & Software*, 2020, vol. 133, p. 104852 DOI: 10.1016/j.envsoft.2020.104852.
- Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, *Transactions of the ASABE*, 2007, vol. 50(3), p. 885–900, DOI:10.13031/2013.23153.
- Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki ozer Rossiiskoi Federatsii i ikh mnogoletnie izmeneniya: nauchno-prikladnoi spravochnik* [Main hydrological characteristics of lakes in the Russian Federation and their long-term changes: a scientific and applied reference book], St. Petersburg, RIAL Publ., 2021, 364 p.
- Ostroumova L.P., Polonsky V.F., Solodovnikova T.Yu. et al. Issledovanie sostavlyayushchikh teplovogo balansa Severnogo Kaspiya i Nevskoi guby [Investigation of thermal balance components of Northern Caspian Sea and the Neva lip], *Trudy Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta*, 2009, no. 212, p. 123–145. (In Russian)
- Perroud M., Goyette S., Martynov A. et al. Simulation of multiannual thermal profiles in deep Lake Geneva: A comparison of one-dimensional lake models, *Limnology and Oceanography*, 2009, vol. 54(5), p. 1574–1594, DOI: 10.4319/lo.2009.54.5.1574.
- Repina I.A. *Metody opredeleniya turbulentnykh potokov nad morskoi poverkhnost'yu* [Methods for determining turbulent flows over the sea surface], Mosco, SRI RAS Publ., 2007, 36 p. (In Russian)
- Rueda F., Vidal J., Schladow G. Modeling the effect of size reduction on the stratification of a large wind-driven lake using an uncertainty-based approach, *Water Resources Research*, 2009, vol. 45, W03411, DOI:10.1029/2008WR006988.
- Slivinski L.C., Compo G.P., Whitaker J.S. et al. Towards a more reliable historical reanalysis: Improvements for version 3 of the Twentieth Century Reanalysis system, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2019, vol. 145, p. 2876–2908, DOI: 10.1002/qj.3598.
- Stepanenko V.M., Goyette S., Martynov A. et al. First steps of a lake model intercomparison project: LakeMIP, *Boreal Environment Research*, 2010, vol. 15, p. 191–202.
- Woolway R.I., Debolskiy A., Golub M. et al. Phenological shifts in lake stratification under climate change, *Nature Communications*, 2021, vol. 12, 2318, DOI: 10.1038/s41467-021-22657-4.
- Wynne J.H., Woelmer W., Moore T.N. et al. Uncertainty in projections of future lake thermal dynamics is differentially driven by lake and global climate models, *PeerJ*, 2023, vol. 11, e15445, DOI: 10.7717/peerj.15445.
- Zdorovenova G.E., Shadrina A.A., Fedorova I.V. Modelirovanie termicheskogo rezhima mal'kikh arkticheskikh ozer [Modeling of thermal regime of small Arctic lakes], *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2016, vol. 1, p. 111–115. (In Russian)

Received 30.07.2023

Revised 10.11.2023

Accepted 14.02.2024