

ТЕРМОГИДРОДИНАМИКА ОЗЁР ЗОНЫ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ РОССИИ: РЕТРОСПЕКТИВНАЯ ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЙ В XXI ВЕКЕ

© 2025 г. С.А. Кондратьев^{a,*}, С.Д. Голосов^{a,**}, И.С. Зверев^{a,***}, А.М. Расулова^{a,****}

^aИнститут озераведения Российской академии наук — СПб ФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: kondratyev@limno.ru

**E-mail: sergey_golosov@mail.ru

***E-mail: iliazverev@mail.ru

****E-mail: ARasulova@limno.ru

Поступила в редакцию 13.03.2025 г.

После доработки 19.03.2025 г.

Принята к публикации 30.04.2025 г.

Цель работы — ретроспективная и прогностическая оценки термических и ледовых характеристик озёр зоны многолетней мерзлоты РФ на основе спутниковой информации и математического моделирования. По спутниковым снимкам определяется географическое положение и площадь озера. С использованием геостатистических зависимостей на основе значений площади водоёма находится его средняя глубина. Полученное значение средней глубины используется в качестве параметра для расчётов термогидродинамических характеристик озера и его донных отложений по одномерной термогидродинамической модели FLake. Данные метеорологического реанализа ERA5 являются основой ретроспективной оценки характеристик водоёма, прогноз последствий климатических изменений к концу XXI в. выполнен на основе сценариев выбросов в атмосферу парниковых газов SSP. Ретроспективные и прогностические расчёты характеристик неизученных и малоизученных озёр выполняются без дополнительной верификации модели и не требуют проведения трудоёмких натурных измерений в труднодоступных районах залегания многолетнемерзлых пород. Для 15 основных озёрных регионов, покрывающих зону многолетней мерзлоты России, проведены ретроспективные (1940–2015) и прогностические (2016–2100) расчёты термогидродинамических характеристик воды и донных отложений для гипотетических озёр, расположенных в центроидах изучаемых озёрных регионов. Результаты расчётов прогрева водной массы и формирования ледового покрова озёр в рассматриваемых регионах соответствуют современным представлениям о потеплении в северных районах нашей страны.

Ключевые слова: озеро, математическая модель, дистанционное зондирование Земли, геостатистические зависимости, модель FLake, криолитозона, климатические сценарии, термогидродинамические характеристики озёр.

DOI: 10.31857/S0869587325070048, EDN: FIDBJK

Более 65% площади России занимает криолитозона, глубина залегания многолетнемерзлых пород (ММП) в которой изменяется от нескольких метров в южной части зоны и на Кольском полуострове до 900 м и более в районе прибрежных равнин Северного Ледовитого океана и некоторых

высокогорных областях. На этой территории насчитывается около 3.3 млн озёр (~88% от общего числа по стране), большая часть которых — неглубокие водоёмы (до 2–3 м) с площадью зеркала примерно 0.01 км², и только примерно 2% водоёмов имеют площадь более 1 км² [1]. Изучение озёр криолитозо-

КОНДРАТЬЕВ Сергей Алексеевич — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН. ГОЛОСОВ Сергей Дмитриевич — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН. ЗВЕРЕВ Илья Сергеевич — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН. РАСУЛОВА Анна Мурадовна — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН.

ны носит эпизодический характер и относится в основном к водоёмам особо охраняемых природных территорий. Крайне низкая изученность северных озёр России в первую очередь связана с их труднодоступностью и высокой стоимостью проведения экспедиционных работ. С 2000-х годов, с развитием спутниковых технологий, ситуация несколько улучшилась, однако такие работы в основном связаны с динамикой изменения площади озёр [2–4].

Цель настоящей статьи — оценка (как ретроспективная, так и прогностическая) временной динамики термических и ледовых характеристик озёр в зоне многолетней мерзлоты России на основе методов спутниковой съёмки и математического моделирования. Объект исследования — малые и средние континентальные озёра (площадью до 100 км²), расположенные в зоне залегания многолетнемерзлых пород на всей территории Российской Федерации. С целью разделения озёр криолитозоны на группы идентичных по морфометрическим параметрам водоёмов было использовано районирование на озёрные регионы, согласно классификации, предложенной в работах [5, 6]. Районирование на озёрные регионы основывается на принципе, подразумевающим общность геологической истории формирования большинства озёрных котловин. Данный подход даёт возможность учитывать влияние геологических и геоморфологических процессов образования озёрной котловины, а также влияние на её формирование климата [6–8]. Единое происхождение котловин позволяет определить типичные особенности озёр и диапазон их изменчивости, обусловленный внутренней структурой региона. Важный критерий,

который был учтён при районировании, — однородность естественной озёрности (отношение площади водоёмов озёр к общей площади территории) внутри каждого региона. Таким образом, для каждого озёрного региона характерно сходство геологических и климатических условий.

Зону залегания ММП практически полностью покрывают следующие пятнадцать озёрных регионов (рис. 1): 1 — кольский сегмент Балтийского кристаллического щита; 2 — прибрежные равнины Баренцева моря; 3 — западный склон Уральской горной страны; 4 — восточный склон Уральской горной страны; 5 — прибрежные равнины Карского моря; 6 — горы Бырранга и Северной Земли; 7 — прибрежные равнины моря Лаптевых; 8 — прибрежные равнины Восточно-Сибирского моря; 9 — аккумулятивные, аккумулятивно-денудационные и озёрно-аллювиальные равнины таёжной зоны; 10 — плато Путорана; 11 — Среднесибирское плоскогорье; 12 — горные области Северо-Восточной Сибири и севера Дальнего Востока; 13 — вулканические области Дальнего Востока; 14 — Алтайско-Саянская горная страна; 15 — Байкальская горная страна. Границы распространения ММП построены на основе материалов Национального атласа России [9].

МЕТОДЫ И МОДЕЛИ

Ниже (рис. 2) приведена схема ретроспективной и прогностической оценки параметров неизученных и малоизученных водных объектов на основе результатов дистанционного зондирования Земли и математического моделирования. Основные эта-

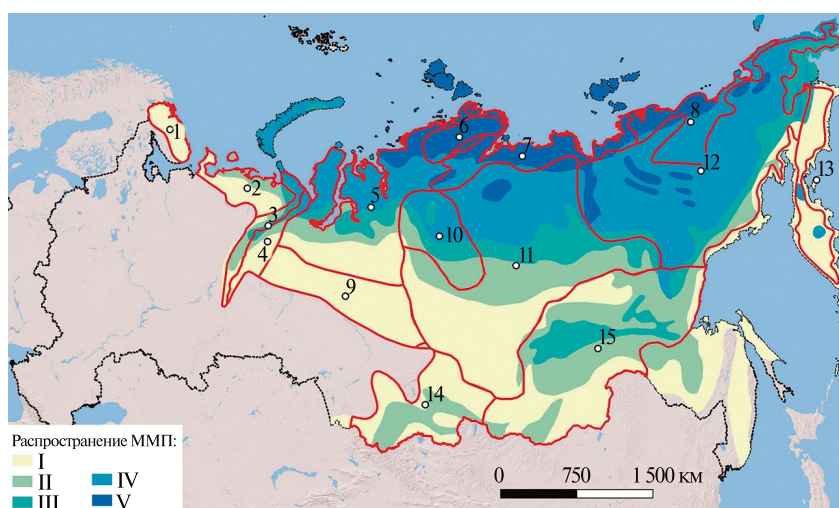


Рис. 1. Озёрные регионы РФ, находящиеся в зоне распространения многолетнемерзлых пород (ММП): I — зона редкоостровного, островного и массивно-островного распространения ММП мощностью мерзлотной толщи 0–100 м, II — зона сплошного распространения ММП мощностью 50–300 м, III — мощностью 100–400 м, IV — мощностью 200–600 м, V — мощностью 400–900 м и ниже.

Красная линия — границы озёрных регионов [6]; чёрная линия — границы РФ; точки — центры соответствующих озёрных регионов



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

пы дистанционной оценки термогидродинамических (ТГД) характеристик неизученного водоёма:

- по космическим снимкам земной поверхности дешифрируется интересующий водный объект, а затем определяются его географические координаты и площадь акватории;
- на основе общедоступных данных (например, баз данных WORDLAKE¹ и HydroLAKES², а также других литературных источников) строятся геостатистические связи между морфометрическими характеристиками однородной группы водных объектов, прежде всего $H = f(A)$, где H — средняя глубина водоёма, A — площадь его акватории;
- по географическим координатам водного объекта из баз данных метеорологического реанализа (например, ERA5³) или на основе метеонаблюдений получают ретроспективную метеоинформацию требуемого разрешения;
- метеопараметры и рассчитанная средняя глубина водоёма подаются на вход модели FLake [11–13] с целью получения ретроспективной оценки характеристик водного объекта;
- прогнозирование последствий климатических изменений в XXI в. может выполняться на основе сценариев выбросов в атмосферу парниковых газов SSP (Shared Socio-economic Pathway⁴). Входная прогностическая информация для модели FLake

для региона исследований основана на результатах пересчёта выбросов парниковых газов SSP в метеорологические параметры по глобальным климатическим моделям. Прогностические сценарии изменения метеопараметров в совокупности с геостатистической оценкой глубины водоёма позволяют получать прогностические оценки характеристик озера в настоящее время.

Термический режим большинства озёр определяют прежде всего атмосферные воздействия и форма озёрной котловины. В изложенной методике воздействие атмосферы учитывается за счёт использования данных метеорологического реанализа при ретроспективной оценке характеристик озера и разных прогностических сценариев изменения метеорологических параметров, соответствующих различным сценариям выброса парниковых газов в атмосферу в будущем. Влияние формы котловины на ТГД озера определяется через учёт соотношений между морфометрическими параметрами водоёма, характерными для рассматриваемого озёрного региона.

Важно иметь в виду, что в зависимости от целей и задач того или иного исследования, а также от особенностей морфометрии озера блоки, представленные на схеме (см. рис. 2), могут быть заменены на аналогичные или полностью отсутствовать. Построенная схема оценки и прогноза изменений характеристик разнотипных озёр различного генетического происхождения может применяться для малых и средних неизученных и малоизученных водоёмов России, включая объекты зоны многолетней мерзлоты.

¹ Разработка Института озероведения РАН [10].

² HydroLAKES. <https://www.hydrosheds.org/products/hydrolakes>

³ ERA5. <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5>

⁴ Climate Data. <https://cds.climate.copernicus.eu> (дата обращения 15.03.2024).

Предлагаемая методика оценки абиотических характеристик неизученных озёр зоны многолетней мерзлоты основана на гидрофизическом моделировании с помощью модели FLake. Эта модель, разработанная совместными усилиями российских и немецких учёных (Институт озероведения РАН, Институт водных проблем Севера РАН, Институт водной экологии и внутреннего рыбоводства Германии (IGB) и Служба погоды Германии (DWD)), представляет собой универсальную одномерную модель ТГД-процессов в озёрах. В настоящее время модель FLake широко применяют в метеорологических организациях разных стран (включая Международный европейский центр среднесрочных прогнозов погоды и систему COSMO в России) для численного прогноза погоды с учётом влияния озёр на локальный климат [14]. Благодаря широкому практическому применению модель FLake может быть использована для оценки неизученных озёр без дополнительной верификации.

Модель основана на решении одномерного нестационарного уравнения теплопроводности как в водной массе, так и в донных отложениях. Вертикальные профили описываются автомодельными представлениями в обеих средах, что позволяет избегать расчёта/задания коэффициентов турбулентного/молекулярного обмена. Несмотря на обширные возможности модели и её универсальность, водные объекты, к которым применяется модель, должны удовлетворять следующим условиям:

- отдельные участки акватории не должны характеризоваться значительными климатическими различиями. Данное условие — следствие одномерности модели;
- процессы перемешивания в водоёме имеют либо ветровое, либо конвективное происхождение. Вторичные эффекты (сейшевые колебания, прибрежное трение и т.д.), а также адвекция не должны играть существенную роль в турбулентном перемешивании водоёма;
- форму дна можно аппроксимировать горизонтальной плоскостью, что обусловлено необходимостью избегать наличия в водоёме склоновых плотностных течений, которые могут приводить к формированию придонного пограничного слоя. Модель не описывает придонный пограничный слой, поскольку вертикальный профиль температуры представлен в автомодельной форме.

В соответствии с перечисленными условиями максимальное значение площади рассматриваемых озёр определено примерно в 100 км² [15].

В настоящей работе для озёрных регионов зоны ММП использованы геостатистические зависимости глубины озера (H) от его площади (A), полученные в результате статистической обработки данных из баз WORLDLAKE [16] и HydroLAKES [17]. В таблице 1 приведены зависимости $H = f(A)$ для раз-

личных озёрных регионов, а также географические координаты их центроидов (центров тяжести). Каждый центроид представляет собой барицентр слоя озёрного региона, его координаты — это средние значения координат всех узлов полигона, которые определены с использованием программы QGIS.

Ретроспективное воздействие климатических факторов на ТГД-процессы в озёрах с 1940 по 2015 г. оценивалось путём использования данных метеорологического реанализа семейства ERA5, которые представляют собой восстановленные значения метеорологических параметров для всей планеты, которые ежедневно обновляют с задержкой примерно в 5 дней. При прогностических расчётах по модели FLake в качестве входных гидрометеорологических данных использованы оценки климатических воздействий по SSP сценариям эволюции антропогенных выбросов парниковых газов в атмосферу [18, 19] с 2016 по 2100 г.

Считалось, что эмиссия парниковых газов в атмосферу должна соответствовать сценариям SSP-2.6 или SSP-8.5, то есть лучшему или худшему с точки зрения воздействия на окружающую среду варианту. Сценарий SSP-2.6 предполагает, что выбросы диоксида углерода начнут неуклонно снижаться и достигнут нуля к 2100 г. В сценарии SSP-8.5 выбросы парниковых газов продолжают расти в течение всего XXI столетия теми же темпами, что и сейчас. Значения метеорологических параметров (коротковолновая радиация, температура воздуха, давление водяного пара, скорость ветра, облачность, осадки), являющиеся входными данными в модель FLake и соответствующие климатическим сценариям SSP в изучаемом регионе, рассчитаны с использованием климатической модели CanESM5. Эта модель входит в ансамбль из 37 глобальных климатических моделей, которые использовались в рамках 6-й фазы международного проекта сравнения объединённых моделей CMIP6⁵. Выбор именно этой модели объясняется тем, что она позволяет получать метеорологические характеристики необходимого разрешения для модели FLake. Стыковка данных реанализа и прогностической информации выполнена для момента начала прогноза, то есть для 2015 г. Адаптация сценариев SSP к ретроспективным данным реанализа и их стыковка выполнены на основе метода корректировки значений метеорологических параметров. Этот метод предложен в работе [20] и использован для согласования данных реанализа ERA5 (1940–2015) и прогностических SSP-сценариев (2016–2100).

ДИНАМИКА ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОЗЁР

Одна из основных целей моделирования — выход за рамки возможного натурного эксперимента — реализована в настоящей работе, поскольку

⁵ CMIP6 climate projections. <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/projections-cmip6?tab=overview>

объектами исследования являются неизученные и малоизученные труднодоступные озёра зоны залегания многолетнемёрзлых пород. Расчёты термогидродинамических характеристик выполнялись для гипотетических озёр, расположенных в точках с координатами центроидов озёрных регионов и средними значениями глубин озёр рассматриваемого региона (см. рис. 1, табл. 1) за период 1940–2100 гг. Ретроспективная динамика характеристик озёр за период 1940–2015 гг. рассчитывалась с использованием информации гидрометеорологического реанализа ERA5. Далее с 2016 до 2100 г. в качестве входной информации служили данные климатических прогнозов SSP-2.6 и SSP-8.5.

На рисунке 3 представлены результаты расчёта среднегодовых значений температуры воды, максимальной толщины льда и продолжительности ледостава в 1940, 2015 и 2100 гг. для 15 озёр, расположенных в центроидах рассматриваемых озёрных регионов.

Как свидетельствуют результаты расчётов, экстремальные условия прогрева водной массы водоёмов характерны для озёрных регионов Алтайско-Саянской горной страны (№ 14) с максимальным прогревом озёр и горы Бырранга и Северной Земли (№ 6) с минимальным прогревом. Среднегодовая температура воды в озёрах этих регионов в 1940 г. составила 8.94 и 0.67°C, соответственно, а в 2015 г. – 9.26 и 0.96°C. При этом к 2100 г. среднегодовой прогрев озёр региона № 14 может достичь значений

11.40°C при реализации худшего климатического сценария SSP 8.5 (возрастёт на 27.1% по отношению к 1940 г.). В регионе № 6 значение среднегодовой температуры воды увеличится с 0.67 до 4.5°C к 2100 г., что составит 572.6% по отношению в 1940 г. При реализации лучшего климатического сценария для всех озёрных регионов сохранится тенденция увеличения средней температуры водоёмов, однако она будет иметь менее выраженный характер. Для озёрных регионов горных областей Северо-Восточной Сибири и севера Дальнего Востока (№ 12) ожидается даже незначительное снижение температуры по сравнению с 2015 г. (на 0.04°C). В целом по всем 15 регионам изменения температуры воды, максимальной толщины льда и продолжительности ледостава за период 1940–2100 гг. составят соответственно 124.5, –31.9 и –26.2% относительно значений 1940 г.

Из общих физических соображений понятно, что изменения средней температуры водной массы озёр ведут к соответствующим изменениям максимальной толщины льда. Это подтверждают выполненные расчёты: при реализации худшего климатического сценария во всех озёрных регионах ожидается снижение максимальной толщины льда. В регионе № 14 снижение значения максимальной толщины льда при реализации наиболее неблагоприятного сценария SSP 8.5 к 2100 г. составит 0.09 м (–14.8%) по отношению к 1940 г. В регионе № 6 указанное снижение может достигать 0.83 м (–36.9%). Однако

Таблица 1. Геоestatистические зависимости средней глубины озера от его площади $H = f(A)$, медианные значения средней глубины озера H_{cp} и географические координаты центроидов для озёрных регионов

№ региона	Географические координаты центроидов	$H = f(A)$	$H_{cp}, м$
1	34.781253 в.д., 68.189015 с.ш.	$H = 6.3967 A^{0.191}$	5.2
2	54.837375 в.д., 67.361336 с.ш.	$H = 4.1834 A^{0.0349}$	4.2
3	61.587303 в.д., 65.221466 с.ш.	$H = 5.4025 A^{0.1432}$	4.6
4	62.53119 в.д., 63.98283 с.ш.	$H = 5.2418 A^{0.1545}$	4.4
5	80.882440 в.д., 68.828103 с.ш.	$H = 4.1285 A^{0.1059}$	3.7
6	100.811096 в.д., 74.905214 с.ш.	$H = 8.9658 A^{0.1751}$	7.9
7	153.976037 в.д., 69.314860 с.ш.	$H = 5.2117 A^{0.1736}$	4.6
8	115.653177 в.д., 72.619205 с.ш.	$H = 4.4222 A^{0.112}$	3.9
9	78.80041 в.д., 61.34931 с.ш.	$H = 3.5516 A^{0.1037}$	3.2
10	95.509105 в.д., 66.887258 с.ш.	$H = 8.0389 A^{0.173}$	6.7
11	109.940358 в.д., 63.974322 с.ш.	$H = 5.1943 A^{0.1701}$	4.3
12	149.87252 в.д., 65.58758 с.ш.	$H = 6.1950 A^{0.1376}$	5.0
13	165.076459 в.д., 59.064097 с.ш.	$H = 4.6982 A^{0.0667}$	4.2
14	93.28403 в.д., 53.15034 с.ш.	$H = 5.9311 A^{0.1355}$	5.2
15	120.486119 в.д., 55.905941 с.ш.	$H = 4.0130 A^{0.1209}$	3.5

Примечание: номер региона соответствует номерам на рисунке 1.

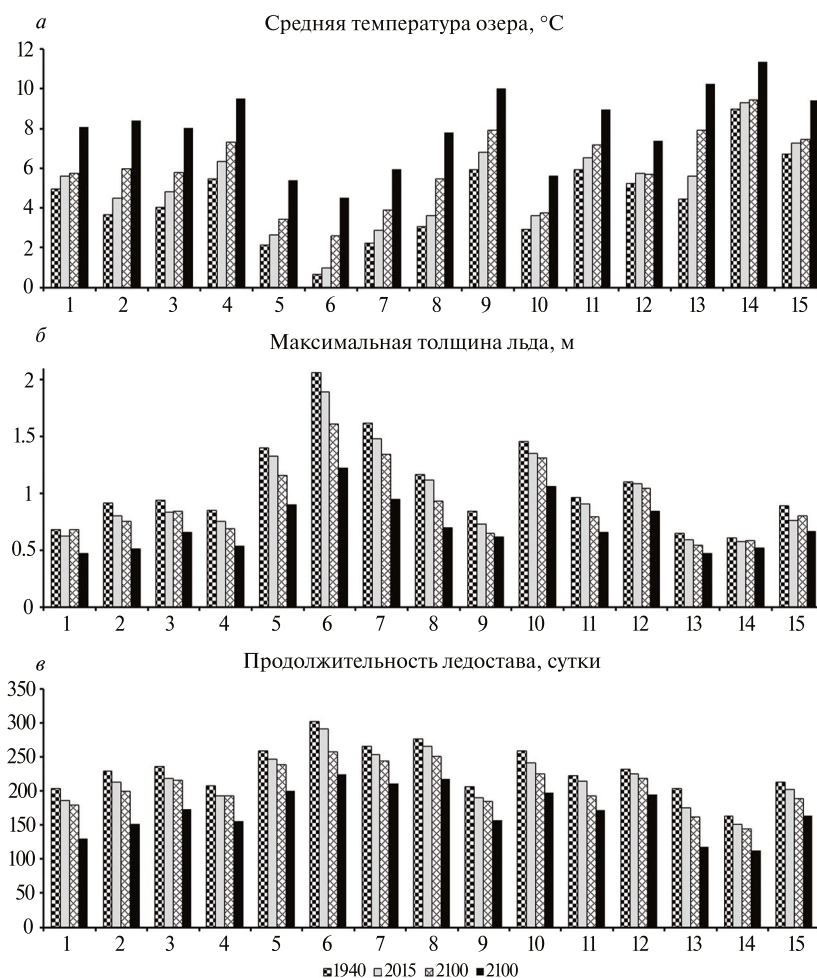


Рис. 3. Результаты расчёта среднегодовых значений температуры воды, максимальной толщины льда и продолжительности ледостава в 1940, 2015 и 2100 гг. (по климатическим сценариям SSP-2.6 и SSP-8.5) для 15 гипотетических озёр, расположенных в центроидах изучаемых озёрных регионов (номера — в соответствии с рис. 1 и табл. 1)

при реализации лучшего климатического сценария максимальная толщина льда для озёрных регионов Кольского сегмента Балтийского кристаллического щита (№ 1), Алтайско-Саянской горной страны (№ 14) и горных областей Северо-Восточной Сибири и севера Дальнего Востока (№ 12) будет практически сопоставима с показателями 1940 г. (от -0.28 до -5.1%). Продолжительность ледостава в рассматриваемых озёрных регионах в целом повторяет закономерность изменения толщины льда, но существенно менее изменчива между регионами по сравнению с температурой воды и максимальной толщиной льда.

Несмотря на общую закономерность распределения средней температуры, максимальной толщины льда и продолжительности ледостава по озёрным регионам, при которой минимальные значения продолжительности ледостава наблюдаются в регионе № 14, а максимальные — в регионе № 6, экстремальные изменения длительности ледостава по отношению к ретроспективным оценкам ожидаются в дру-

гих озёрных регионах. Минимальное сокращение продолжительности ледостава по худшему сценарию может произойти в озёрном регионе горных областей Северо-Восточной Сибири и севера Дальнего Востока (№ 12) и составит 36 суток по отношению к 1940 г., а при лучшем сценарии — 13 суток. Максимальное изменение продолжительности ледостава при худшем климатическом сценарии ожидается в озёрном регионе Вулканических областей Дальнего Востока (№ 13). Здесь длительность ледостава уменьшится на 86 суток (-42.2%) по сравнению с 1940 г. и сократится до 117 суток.

Минимальные относительные изменения средних температур водоёмов (до 100% относительно 1940 г. при худшем климатическом сценарии) характерны для озёрных регионов с континентальным климатом (№ 3, 4, 9–12, 14, 15), тогда как максимальные — для прибрежных регионов (№ 2, 5–8, 13). Исключение составляет озёрный регион Кольского сегмента Балтийского кристаллического щита (№ 1),

где, несмотря на прибрежное расположение, средняя температура озера изменяется незначительно. В отличие от средней температуры водоёмов, максимальная толщина льда не столь чётко коррелирует с климатом и удалённостью от берега. В этом случае минимальное относительное уменьшение максимальной толщины льда (ниже 30% относительно 1940 г. по худшему сценарию) ожидается в озёрных регионах с континентальным климатом (№ 9, 10, 12, 14, 15), а максимальное — в прибрежных (№ 1, 3, 4–8). Исключение составляют вулканические области Дальнего Востока (№ 13), где, несмотря на морской климат, отмечается минимальное уменьшение толщины льда, и Среднесибирское плоскогорье (№ 11), где в условиях континентального климата наблюдается наибольшее относительное изменение максимальной толщины льда.

ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДНОЙ МАССЫ

На рисунке 4 показаны ретроспективная и прогностическая оценки временной динамики среднегодовой температуры водной массы и максимальной толщины ледового покрова для гипотетических водоёмов в центрах озёрных регионов Алтайско-Саянской горной страны (№ 14) и гор Бырранга и Северной Земли (№ 6), в которых (см. рис. 3) выявлены экстремальные значения прогрева за период 1940–2100 гг.

Среднегодовые значения температуры озёр региона № 14 практически не изменились за период с 1940 г. по настоящее время и слабо реагируют на климатические изменения (экологически благополучный сценарий SSP-2.6). Реализация сценария SSP-8.5 приведёт к росту средней температуры озёр до 12°C. Озёрный регион № 6 демонстрирует существенную ретроспективную нестабильность ТГД-характеристик, которая проявляется в том, что средняя температура воды в 1960–1990 гг. иногда снижалась до 0°C. Последующее возрастание температуры воды плавно переходит в прогностические оценки по обоим сценариям и продолжается до середины XXI в. После этого результаты расчёта по экологически благоприятному сценарию SSP-2.6 стабилизируются около значения среднегодовой температуры воды 2.7°C и максимальной толщины льда 1.6 м. Реализация неблагоприятного сценария SSP-8.5 приведёт к увеличению среднегодовой температуры до 4.6°C и уменьшению максимальной толщины ледового покрова до 1.2 м к концу столетия. Рисунок 5 иллюстрирует результаты ретроспективной и прогностической оценки внутригодовой динамики потока тепла через дно и толщины слоя сезонного оттаивания донных отложений для озёр Алтайско-Саянской горной страны и гор Бырранга и Северной Земли в период с 2015 по 2100 г.

Рассчитанные абсолютные значения потока тепла через границу раздела вода–дно крайне невелики — менее 8 Вт/м², к тому же в течение года он может быть разнонаправленным, и суммарный поток тепла, направленный в донные отложения, будет ещё меньше (рис. 5). Тем не менее этого оказывается достаточно для небольшого слоя сезонного оттаивания донных отложений. По данным моделирования, толщина слоя сезонного оттаивания в озёрах региона № 14 (Алтайско-Саянская горная страна) может достигать 0.14 м, для озёр региона № 6 (горы Бырранга и Северной Земли) — 0.05 м. При этом потепление климата приведёт к смещению максимума времени оттаивания донных отложений на более ранний период.

Ситуация с прогревом водной массы и донных отложений, а также с формированием ледового покрова озёр в рассматриваемых озёрных регионах зоны многолетней мерзлоты соответствует современным представлениям о потеплении на северных территориях нашей страны. Прогрев воды и донных отложений увеличивается, а толщина льда уменьшается во всех водоёмах, при этом образование, на-

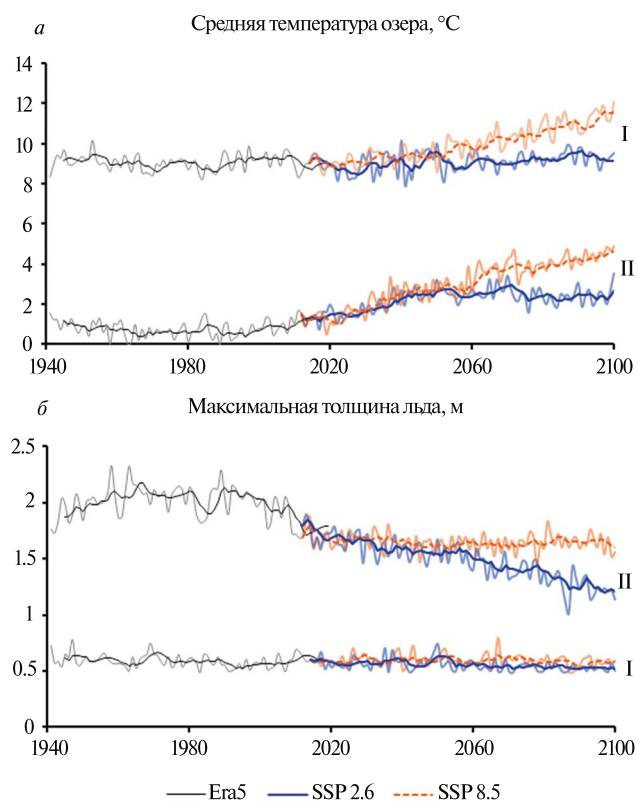


Рис. 4. Ретроспективная (Era5) и прогностическая (SSP-2.6 и SSP-8.5) оценки динамики среднегодовой температуры водной массы и максимальной толщины ледового покрова (жирные линии — пятилетнее скользящее среднее) для озёр, расположенных в центроидах областей № 14 (I) и № 6 (II) за период 1940–2100 гг.

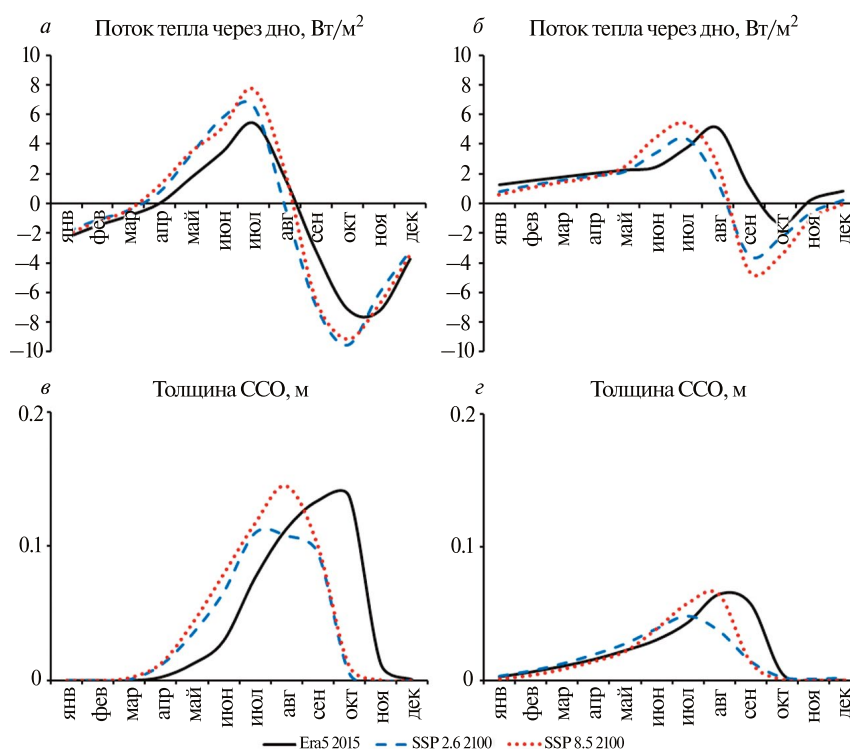


Рис. 5. Ретроспективная (Era5 2015 г.) и прогностическая (SSP-2.6 2100 г. и SSP-8.5 2100 г.) оценки внутригодовой динамики потока тепла через дно и толщины слоя сезонного оттаивания (ССО) донных отложений для озёр, расположенных в центроидах областей 14 (а, в) и 6 (б, г) в 2015 и 2100 гг.

растание и таяние льда в озёрах является главным образом результатом взаимодействия водной массы с атмосферой.

* * *

Имитационные (ретроспективные) и прогностические расчёты термогидродинамических характеристик неизученных водных объектов на основе модели FLake позволили сформулировать следующие основные выводы.

В целом по всем 15 озёрным регионам изменения температуры воды, максимальной толщины льда и продолжительности ледостава за период 1940–2100 гг. составят соответственно 124.5, –31.9 и –26.2% относительно значений 1940 г.

Экстремальные условия прогрева водной массы водоёмов характерны для озёрных регионов Алтайско-Саянской горной страны (№ 14) с максимальным прогревом озёр и гор Бырранга и Северной Земли (№ 6) с минимальным прогревом.

Повышение средней температуры водной массы озёр ведёт к сокращению максимальной толщины льда. При реализации худшего климатического сценария (сохранение нынешнего уровня выброса в атмосферу парниковых газов) во всех озёрных регионах ожидается снижение максимальной толщины льда. При реализации более благоприятного климатического сценария максимальная толщина льда

в озёрных регионах № 1, 13–15 будет практически сопоставима с показателями 1940 г.

Продолжительность ледостава в рассматриваемых озёрных регионах в целом повторяет закономерность изменения толщины льда, но существенно менее изменчива между регионами по сравнению с температурой воды и максимальной толщиной льда.

Рассчитаны значения потока тепла через границу раздела вода–дно, которые в течение года могут быть разнонаправленными, а также слоя сезонного оттаивания донных отложений. Толщина слоя сезонного оттаивания в озёрах региона № 14 может достигать 0.14 м, в озёрах региона № 6 – 0.05 м. Потепление климата приведёт к смещению времени оттаивания донных отложений на более ранний период.

Результаты моделирования позволяют предположить, что ТГД-характеристики водных объектов в озёрных регионах с континентальным климатом (№ 9–11, 14, 15) менее зависимы от возможных климатических воздействий, чем в приморских регионах (№ 1, 2, 5–8, 13).

Основными факторами, определяющими перечисленные закономерности формирования термогидродинамического режима изучаемых озёр, являются особенности строения озёрной котловины и климатические воздействия. Особенности строения котловины учитываются в рассматриваемой расчётной методике как соотношение площади ак-

ватории и средней глубины озера. Ретроспективные климатические воздействия приняты во внимание при формировании баз данных реанализа на основе материалов наземного мониторинга. Климатические сценарии на ближайшее будущее разработаны на основе результатов моделирования общей циркуляции атмосферы и океана [18]; среди прочих факторов учтена высота озёрной котловины над уровнем моря.

Ответы на возможные вопросы о причинах возникновения выявленных на основе моделирования особенностей и закономерностей формирования термогидродинамического режима предполагают анализ соотношения морфометрических и климатических параметров, которые для рассмотренных озёрных регионов существенно различаются. Очевидное направление совершенствования методов оценки морфометрических параметров озёр — детальное изучение строения озёрных котловин в пределах каждого региона. Для этого необходимо создать расширенную и хорошо оснащённую систему мониторинга поверхностных вод. Всё это не затронет общую концепцию методики дистанционной оценки характеристик неизученных и малоизученных озёр нашей страны и приведёт лишь к существенному уточнению расчётных оценок.

Для расширения возможностей предложенной методики в область оценки химико-биологических параметров озёрной экосистемы нужно привлекать соответствующие экосистемные модели. Примером такой модели может служить FLakeEco [21], которая позволяет выполнять расчёты содержания кислорода в воде, биомассы и первичной продукции фитопланктона. Однако такая модель требует верификации по данным натурных наблюдений, с тем чтобы определить её химико-биологические параметры, а это затруднительно в отдалённых северных регионах. Остаётся надеяться на развитие системы мониторинга водных объектов, в рамках которой будет собран материал для апробации моделей химико-биологических процессов в озёрах (например, FLakeEco), что позволит дополнить методику, изложенную в настоящей работе.

Представленные результаты имитационного и прогностического моделирования подтверждают широкий спектр возможностей предложенной методики при решении задач количественной оценки и прогноза изменений термогидродинамических процессов в малых и средних по площади озёрах, расположенных в различных физико-географических и климатических условиях, при недостатке или отсутствии данных натурных наблюдений. Таким образом реализуется одно из основных предназначений моделирования — выход за рамки возможного натурального эксперимента.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке проекта Российского научного фонда 24-27-00067.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Измайлова А.В.* Водные ресурсы озёр Российской Федерации // География и природные ресурсы. 2016. № 4. С. 5–14.
Izmailova A.V. Water resources of lakes in the Russian Federation // Geography and Natural Resources. 2016, no. 4, pp. 5–14. (In Russ.)
2. *Кравцова В.И., Родионова Т.В.* Исследование динамики площади и количества термокарстовых озёр в различных районах криолитозоны России по космическим снимкам // Криосфера Земли. 2016. Т. 20. № 1. С. 81–89.
Kravtsova V.I., Rodionova T.V. Study of the dynamics of the area and number of thermokarst lakes in different regions of the Russian cryolithozone using space images // Earth Cryosphere. 2016, vol. 20, no. 1, pp. 81–89. (In Russ.)
3. *Пшеничников А.Е.* Исследование динамики термокарстовых озёр в различных районах криолитозоны России по космическим снимкам за первые два десятилетия XXI века // Геодезия и картография. 2021. Т. 82. № 7. С. 32–42. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-973-7-32-42
Pshenichnikov A.E. Study of thermokarst lakes dynamics in different regions of the Russian cryolithozone based on space images for the first two decades of the XXI century // Geodesy and Cartography. 2021, vol. 82, no. 7, pp. 32–42. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-973-7-32-42 (In Russ.)
4. *Брыксина Н.А., Полищук Ю.М.* Ландшафтно-геокриологический анализ изменения количества озёр на территории Западной Сибири с использованием космических снимков // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2016. № 5. С. 36–45.
Bryksina N.A., Polishchuk Y.M. Landscape-geocryological analysis of changes in the number of lakes on the territory of Western Siberia using space images // Problems of Environment and Natural Resources. 2016, no. 5, pp. 36–45. (In Russ.)
5. *Румянцев В.А.* Озёра азиатской части России. СПб.: Своё издательство, 2017.
Rumyantsev V.A. Lakes of the Asian part of Russia. SPb.: Svooy publishing house, 2017. (In Russ.)
6. *Измайлова А.В.* Озёра России. Закономерности распределения, ресурсный потенциал. СПб.: Папирус, 2018.
Izmailova A.V. Lakes of Russia. Regularities of distribution, resource potential. SPb.: Papyrus, 2018. (In Russ.)
7. Реки и озёра мира. Энциклопедия / Гл. ред. В.И. Данилов-Данильян. М.: Энциклопедия, 2012.
Rivers and lakes of the world. Encyclopedia / Ed. by V.I. Danilov-Danilyan. Moscow: Encyclopedia Publishing House, 2012. (In Russ.)

8. Румянцев В.А., Дробкова В.Г., Измайлова А.В. Озёра европейской части России. СПб.: ЛЕМА, 2015.
Rumyantsev V.A., Drabkova V.G., Izmailova A.V. Lakes of the European part of Russia. SPb.: LEMA, 2015. (In Russ.)
9. Национальный атлас России. Т. 2. Природа. Экология / Гл. ред. А.В. Бородко, гл. ред. тома В.М. Котляков. М.: Картография, 2007.
National Atlas of Russia. Vol. 2. Nature. Ecology / Editor-in-Chief A.V. Borodko, Editor-in-Chief of the volume V.M. Kotlyakov. Moscow: Cartography, 2007. (In Russ.)
10. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015621549 Российская Федерация. Озёра мира WORLDLAKE: № 2015620713: заявл. 15.06.2015; опублик. 13.10.2015 / Н.В. Кочков, С.В. Рянжин; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт озераведения Российской академии наук (ИНОЗ РАН). Certificate of state registration of database No. 2015621549 Russian Federation. WORLDLAKE World Lakes: No. 2015620713: claimed 15.06.2015; published 13.10.2015 / N.V. Kochkov, S.V. Ryzanzhin; applicant Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences (INOZ RAS). (In Russ.)
11. Golosov S., Kirillin G. A parameterized model of heat storage by lake sediments // *Environmental Modelling & Software*. 2010, vol. 25, no. 6, pp. 793–801. DOI: 10.1016/j.envsoft.2010.01.002
12. Kirillin G., Nützmann G., Hochschild J. et al. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage // *Environmental Modelling & Software*. 2011, vol. 26, no. 5, pp. 683–684.
13. Mironov D., Heise E., Kourzeneva E. et al. Implementation of the lake parameterization scheme Flake into the numerical weather prediction model COSMO // *Boreal environ. Res.* 2010, vol. 15, pp. 218–230.
14. Mironov D.V. Parameterization of Lakes in Numerical Weather Prediction. Description of a Lake Model // COSMO Technical Report. No. 11. Offenbach am Main: German Weather Service, 2008.
15. Zverev I.S., Golosov S.D., Kondratiev S.A., Rasulova A.M. Procedure for Remote Assessment of the Characteristics of Unexplored Lakes in the Continental Part of the Russian Tundra // *Doklady Earth Sciences*. 2023, vol. 511, no. 2, pp. 726–731. DOI: 10.1134/s1028334x23600779
16. Рянжин С.В., Ульянова Т.Ю. Геоинформационная система “озёра мира” – GIS WORLDLAKE // Доклады Академии наук. 2000. Т. 370. № 4. С. 542–545.
Ryzanzhin S.V., Ulyanova T.Yu. Geoinformation system “lakes of the world” – GIS WORLDLAKE // *Reports of the Academy of Sciences*. 2000, vol. 370, no. 4, pp. 542–545. (In Russ.)
17. Messager M., Lehner B., Grill G., Nedeva I., Schmitt O. Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach // *Nat Commun*. 2016, vol. 7 (1), 13603. DOI: 10.1038/ncomms13603
18. IPCC: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2021. DOI:10.1017/9781009157896
19. Семёнов С.М., Гладильщикова А.А. Сценарии антропогенных изменений климатической системы в XXI веке // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2022. Т. 8. № 1. С. 75–106. DOI: 10.21513/2410-8758-2022-1-75-106
Semenov S.M., Gladilshchikova A.A. Scenarios of anthropogenic changes in the climate system in the XXI century // *Fundamental and Applied Climatology*. 2022, vol. 8, no. 1, pp. 75–106. DOI: 10.21513/2410-8758-2022-1-75-106 (In Russ.)
20. Кондратьев С.А., Бовыкин И.В. Влияние возможных климатических изменений на гидрологический режим системы водосбор–озеро // *Метеорология и гидрология*. 2003. № 10. С. 86–96.
Kondratyev S.A., Bovykin I.V. Influence of possible climatic changes on the hydrological regime of the watershed-lake system // *Meteorology and Hydrology*. 2003, no. 10, pp. 86–96. (In Russ.)
21. Терзевик А.Ю., Пальшин Н.И., Голосов С.Д. и др. Гидрофизические аспекты формирования кислородного режима мелководного озера, покрытого льдом // *Водные ресурсы*. 2010. Т. 37. № 5. С. 568–579.
Terzhevik A.Yu., Palshin N.I., Golosov S.D. et al. Hydrophysical aspects of oxygen regime formation in a shallow ice-covered lake covered // *Water Resources*. 2010, vol. 37, no. 5, pp. 568–579. (In Russ.)

THERMOHYDRODYNAMICS OF LAKES IN THE PERMAFROST ZONE OF RUSSIA: RETROSPECTIVE ASSESSMENT AND FORECAST OF CHANGES IN THE 21st CENTURY

S.A. Kondratiev^{a,*}, S.D. Golosov^{a,**}, I.S. Zverev^{a,***}, A.M. Rasulova^{a,****}

^a*Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences – St. Petersburg FRC RAS, St. Petersburg, Russia*

^{*}*E-mail: kondratyev@limno.ru*

^{**}*E-mail: sergey_golosov@mail.ru*

^{***}*E-mail: iliazverev@mail.ru*

^{****}*E-mail: ARasulova@limno.ru*

The objective of the work is a retrospective and prognostic assessment of thermal and ice characteristics of lakes in the permafrost zone of the Russian Federation based on satellite information and mathematical modeling. The geographic location and area of the lake are determined using satellite images. Using geostatistical dependencies based on the area values of the reservoir, its average depth is found. The obtained value of the average depth is used as a parameter for calculating the thermohydrodynamic characteristics of the lake and its bottom sediments using the one-dimensional thermohydrodynamic model FLake. The ERA5 meteorological reanalysis data are the basis for the retrospective assessment of the reservoir characteristics; the forecast of the consequences of climate change by the end of the 21st century is made on the basis of SSP greenhouse gas emission scenarios into the atmosphere. Retrospective and prognostic calculations of the characteristics of unexplored and poorly studied lakes are performed without additional verification of the model and do not require labor-intensive in-kind measurements in hard-to-reach areas of permafrost. Retrospective (1940–2015) and prognostic (2016–2100) calculations of thermohydrodynamic characteristics of water and bottom sediments for hypothetical lakes located in the centroids of the studied lake regions were performed for 15 main lake regions covering the permafrost zone of Russia. The results of calculations of water mass heating and ice cover formation in lakes in the regions under consideration correspond to modern ideas about global warming in the northern regions of our country.

Keywords: lake, mathematical model, Earth remote sensing, geostatistical dependencies, FLake model, cryolithozone, climate scenarios, thermohydrodynamic characteristics of lakes.