



DOI 10.59887/2073-6673.2025.18(2)-10
EDN ONRDHI

УДК 504.455; 519.688; 528.88

© С. А. Кондратьев, С. Д. Голосов, И. С. Зверев, А. М. Расулова*, 2025

Институт озераедения Российской академии наук — обособленное структурное подразделение
Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН, 196105, г. Санкт-Петербург,
ул. Севастьянова, д. 9

*arasulova@limno.ru

Дистанционная оценка глубины водоемов по дате начала ледостава с использованием гидрофизической модели

Статья поступила в редакцию 08.11.2024, после доработки 26.02.2025, принята в печать 29.05.2025

Аннотация

Цель исследования — разработка методики оценки средней глубины озера на основе дистанционной информации о ледовых условиях с использованием методов моделирования термогидродинамических процессов в замерзающем водоеме. Основным инструментом достижения поставленной цели является гидрофизическая модель озера FLake. С использованием модели и метеоданных реанализа семейства ERA5 для координат выбранной точки расположения объекта рассчитывается время ледостава на водоеме при различных значениях его средней глубины. По данным дистанционного зондирования Земли оценивается дата или интервал времени замерзания акватории водоема. При наличии данных за несколько лет, глубина водоема уточняется осреднением значений для каждого года. При дискретности спутниковых снимков с интервалом в несколько суток определяется диапазон средних глубин озера, соответствующий промежутку времени между пролетами спутника над водоемом. Информация о начале ледовых явлений — результаты тематического дешифрирования спутниковых снимков Sentinel-2, Landsat-7, 8, 9 за период с 2016 по 2023 годы. Методика апробирована на четырех группах морфометрически исследованных озер на многолетнемерзлых почвах Восточной Сибири в Республике Бурятия и Забайкальском крае. Результаты апробации показали удовлетворительное соответствие рассчитанных и измеренных значений средней глубины рассматриваемых озер. Точность предложенной методики ограничена качеством и количеством спутниковых снимков в регионе исследований. Перспективы методики заключаются в возможности полностью дистанционной оценки водных ресурсов малоизученных регионов страны.

Ключевые слова: гидрофизическая модель озера, спутниковая съемка, реанализ, средняя глубина, ледостав

© S. A. Kondratyev, S. D. Golosov, I. S. Zverev, A. M. Rasulova*, 2025

Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, 9 Sevastyanova Str., St. Petersburg, 196105, Russia

*arasulova@limno.ru

REMOTE ESTIMATION OF WATER BODY DEPTH BASED ON THE DATE OF THE BEGINNING OF ICE FORMATION USING A HYDROPHYSICAL MODEL

Received 08.11.2024, Revised 26.02.2025, Accepted 29.05.2025

Abstract

The aim of the study is to develop a methodology for estimating the average lake depth based on remote sensing data of ice conditions using methods of modelling thermohydrodynamic processes in a freezing water body. The primary tool for accomplishing this goal is the FLake — lake hydrophysical model. Using meteorological data from the ERA5 reanalysis for the

Ссылка для цитирования: Кондратьев С.А., Голосов С.Д., Зверев И.С., Расулова А.М. Дистанционная оценка глубины водоемов по дате начала ледостава с использованием гидрофизической модели // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2025. Т. 18, № 2. С. 137–150. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(2\)-10](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(2)-10) EDN ONRDHI

For citation: Kondratyev S.A., Golosov S.D., Zverev I.S., Rasulova A.M. Remote Estimation of Water Body Depth Based on the Date of the Beginning of Ice Formation Using a Hydrophysical Model. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(2):137–150. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(2\)-10](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(2)-10)

coordinates of the selected water body, the model calculates the time of ice formation on the water body at different values of its average depth. Based on remote sensing data, the date or time interval of water body freezing estimated. If data for several years are available, the depth of the water body specified by averaging the values for each year. At discreteness of satellite images with an interval of several days, the range of average lake depths corresponding to the time interval between satellite passes over the water body is determined. Information on the onset of ice phenomena was obtained based on the results of thematic interpretation of Sentinel-2, Landsat-7, 8, 9 satellite images for the period from 2016 to 2023. The methodology tested on four groups of morphometrically- studied lakes located in permafrost zone of Eastern Siberia in the Republic of Buryatia and Transbaikial Territory. The results of approbation showed a satisfactory correspondence between the calculated and measured values of the average depth of the lakes under consideration. The quality and quantity of satellite images in the study region limited the accuracy of the proposed methodology. The prospects of the methodology lie in the possibility of fully remote assessment of water resources of poorly studied regions of the country.

Keywords: lake hydrophysical model, satellite imagery, reanalysis, mean depth, ice formation

1. Введение

На современных спутниковых снимках в пределах Российской Федерации дешифрируется 3,8 млн естественных водоемов. Только в районах распространения многолетнемерзлых пород их 3,3 млн (88 % от общего числа по стране) [1]. Водные объекты этих территорий относятся к категории малоизученных из-за их труднодоступности и невозможности выполнения регулярных контактных измерений морфометрических, термогидродинамических и других характеристик.

Средняя глубина озера является важным морфометрическим параметром водоёма. Определение средних глубин озёр необходимо для расчёта уровня воды и его колебаний в течение года, что важно для прогнозирования паводков, половодий, засух и других природных явлений, влияющих на водохозяйственную деятельность. Несмотря на то, что промерные работы на водоемах имеют большое значение для определения формы ложа водоёма, объёма содержащейся в нём воды и других гидрологических исследований, они не позволяют быстро оценивать среднюю глубину для множества водных объектов.

Выбор метода определения средней глубины озера зависит от доступных данных, целей исследования и характеристик самого озера. Для точных расчетов предпочтительны батиметрические методы, тогда как для предварительных оценок могут использоваться эмпирические формулы или аппроксимационные зависимости. Среди камеральных методов определения глубин водоемов наиболее часто используют геостатистические методы, методы аппроксимации формы озерной котловины, спутниковые методы и гидродинамическое моделирование. Выбор методов определения глубин зависит от поставленных задач, доступных данных и технологических возможностей.

Для определения средних глубин групп идентичных озёр в основном используются геостатистические методы, суть которых заключается в выявлении статистических зависимостей между средней глубиной и другими морфометрическими параметрами озерной котловины [2–5]. Этот метод целесообразно применять при наличии достаточной выборки морфометрически изученных озёр. Такие выборки формируются на основе различных предположений о географическом расположении озёр, принадлежности их к различным природным зонам и едином генетическом происхождении.

Методы аппроксимации формы озерной котловины заключается в определении линейных размеров озера (как правило, длины и ширины) с последующим предположением, что котловину можно аппроксимировать параболоидом, эллипсом, конусом и другими фигурами [6, 7]. Понятно, что такой метод малоприменим для озёр неправильных форм с сильно изрезанной формой береговой линией.

К спутниковым методам определения глубин относятся различные подходы, среди которых можно выделить методы, основанные на получении данных о рельефе дна и уровне воды, измеренного с помощью альтиметра (например, ERS-2, EnviSat, TOPEX, Jason-1 и Jason-2), а также комбинированные методы с использованием оптических сенсоров типа Landsat или Sentinel, которые используются для оценки прозрачности воды и ее цвета, что косвенно связано с глубиной [8, 9].

Методы гидродинамического моделирования для определения глубин водоемов могут использовать различные связи глубины водоема с термодинамическими характеристиками, ветровыми волнами, перемещение донных отложений и т. д. [10]. Также используются различные комбинации вышеописанных методов. Совокупность таких методов как спутниковые данные и гидродинамическое моделирование, расширяют возможности для изучения морфометрии озёр.

С целью преодоления сложностей при изучении многочисленных труднодоступных озёр северных территорий нашей страны в Институте озероведения РАН проводится разработка методик дистанционной оценки характеристик неизученных озёр зон северных территорий Российской Федерации с использо-

ванием спутниковой информации и математического моделирования. Целью настоящего исследования является разработка методики оценки средней глубины озера на основе дистанционной информации динамике ледостава с использованием методов моделирования термогидродинамических (ТГД) процессов в замерзающем водоеме.

2. Регион исследования

Объектами исследования являются 4 группы морфометрически изученных озер на многолетнемерзлых почвах таёжной природной зоны Восточной Сибири в Республике Бурятия и Забайкальском крае: 1) Еравнинские озера [11, 12]; 2) озера Амутской котловины [12–14]; 3) Ивано-Арахлейские озера [15]; 4) Куандо-Чарские озера [16]; 5) отдельно расположенное озеро Баунт, которое использовалось для отработки методики (рис. 1, табл. 1). Озера расположены в зоне континентального и резко континентального климата и характеризуются значительным количеством ясных дней, что облегчает тематическое дешифрирование спутниковых снимков.

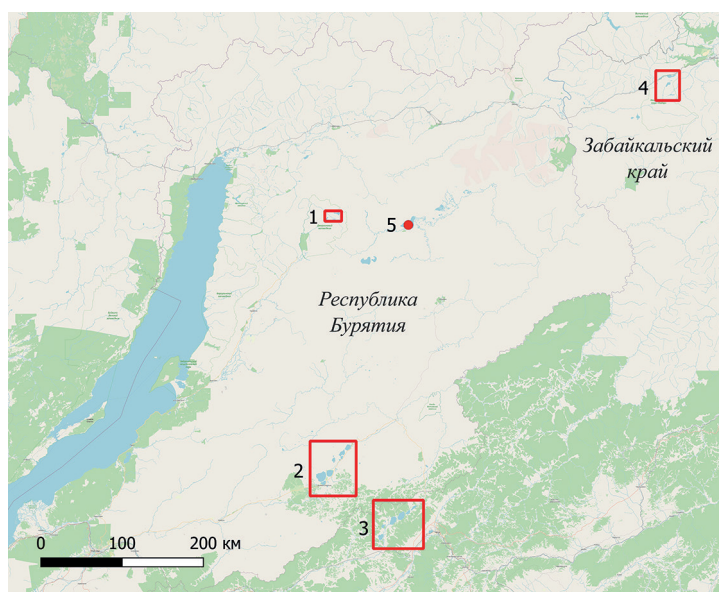


Рис. 1. Исследуемые группы озер: 1 — озера Амутской котловины; 2 — Еравнинские озера; 3 — Ивано-Арахлейские озера; 4 — Куандо-Чарские озера; 5 — оз. Баунт

Fig. 1. Study lake groups: 1 — lakes of the Amut basin; 2 — Eravninsk lakes; 3 — Ivano-Arakhleysk lakes; 4 — Kuando-Char lakes; 5 — Lake Baunt

Таблица 1

Table 1

Основные морфометрические характеристики рассматриваемых озер: площадь зеркала (S , км²), максимальная глубина ($H_{\max}$, м), средняя глубина (H_{avg} , м), максимальная длина (L , км), максимальная ширина (B , км)

Main morphometric characteristics of the studied lakes. Surface area (S , км²); maximum depth ($H_{\max}$, м); average depth (H_{avg} , м); maximum length (L , км); maximum width (B , км)

Название	S , км ²	$H_{\max}$, м	H_{avg} , м	L , км	B , км
Баунт	111	33	17	16,3	9
Еравнинские озера (Еравно-Харгинская система)					
Сосновое	22,7	5,10	2,8	7,8	4,5
Бол. Еравное	104	5,7	3,5	14	13
Мал. Еравное	56,2	2,5–3,5	1,8	9,7	8,4
Аршан (Ангирта)	1,24	—	1,5	1,4	1

Окончание табл. 1

Fin table 1

Название	S, км ²	H _{max} , м	H _{avg} , м	L, км	B, км
Гунда	16,8	5	3,5	4,5	3
Мал. Харга	7,4	2,4	1,4	3	3
Бол.Харга	29,5	2	1,5	8,5	4,5
Исинга	32,98	4,6	2,7	7,2	5,9
Щучье	3,1	9	5,3	2,37	1,97
Озера Амутской котловины (верховья р. Баргузин, заповедник Джергинский)					
Амут	10,7	70	10–15	6,8	3,5
Якондыкон	1,16	21	5–10	1,2	0,7
Балан-Тамур	0,95	16	2	2,3	1,1
Малан-Зурхен	2,62	15	5–7	3	1,2
Чурикто	0,56	14	2	0,3	0,25
Ивано-Арахлейские озера (Беклемишевские озера, Читинские озера)					
Иргень	33,2	3,1	1,8	8	4,2
Большой Ундугун	11,6	2,2	2,1	5	2,3
Шакшинское	51,8	4,5	4,4	11	4,8
Арахлей	58,2	17	10,4	11	5,3
Иван	15,2	4,4	3,1	7,1	2,1
Тасей	14,5	3,1	2,1	8,1	1,8
Куандо-Чарские озера					
Большое Леприндо	18,15	65	25	11,5	2,8
Малое Леприндо	6,05	67	30	7	1,5
Леприндокан	12,1	32	8,6	7	3,3
Довочан	4,9	48,5	33,3	5,5	1,2

Озера Амутской котловины (55°11'10,7"с.ш. 113°00'54,7"в.д.) находятся в верхней части бассейна Баргузина в зоне сочленения Икатского и Баргузинского хребтов на абсолютной высоте 1200–1400 м. Резко континентальные климатические условия Забайкалья в Амутской котловине становятся еще более суровыми за счет перепада высот. Средняя температура воздуха самого холодного месяца (января) — –26 °С, самого теплого летнего месяца (июля) — +11 °С. Такие климатические условия приводят к повсеместному распространению многолетней мерзлоты [17]. Озера Амутской котловины 8–9 месяцев в году покрыты льдом — вскрытие от льда происходит в середине июня [13]. Начало ледостава для настоящей группы озер приходится на середину — конец октября [18]. Аналогичны климатические условия в районе озера Баунт (55°11'32,2" с. ш. 113°00'24,3" в. д.).

Еравнинские озера (Еравно-Харгиснская система озер) (52°46'20,8"с.ш. 111°42'43,9"в.д.) расположены на водоразделах рек Витим (бассейн р. Лена) и Уда (бассейн оз. Байкал) в Еравнинской котловине, находящейся между отрогами хребта Зусы. Климат района резко континентальный. Температура января составляет –35... –40 °С, температуры июля поднимаются до 25–28 °С, повсеместно развита многолетняя мерзлота, нижняя граница которой находится на глубине 100–250 м, при средней мощности деятельного слоя около 2 м [19]. Ледостав озер в основном начинается во второй половине октября, вскрытие от льда происходит в первой половине мая [20].

Озера Ивано-Арахлейской группы (52°09'36,0"с.ш. 112°43'22,0" в. д.) расположены в межгорной Беклемишевской впадине на абсолютной высоте около 950 м на стыке водосборных бассейнов рек Лены и Енисея. За счет горного рельефа климат впадины умеренно влажный, со среднегодовой температурой воздуха –3,2 °С [21, 22]. Первые ледовые явления на озерах Ивано-Арахлейской группы начинаются в октябре, при этом ледостав устанавливается первым на Шакшинском озере, последним на Арахлее. Средняя продолжительность ледостава на данной системе озер составляет 185–226 дней [23].

Куандо-Чарские озера (озера Большое и Малое Леприндо, Леприндокан, Довочан) (56°33'10,1"с.ш., 117°28'50,3"в.д.) расположены на водоразделе рек Куанды и Чары в Верхнечарской котловине в предгорьях хребта Кодар на абсолютной высоте около 1000 м [24]. Средняя годовая температура воздуха Верхнечарской котловины колеблется от –3,4 °С до –8,0 °С. Наиболее холодный месяц — январь (от –25,8 до –3,8 °С), наиболее теплый — июль (от 14,7 до 16,3 °С). Отрицательные температуры отмечаются в течение 7–8 месяцев в году. Осень наступает быстро, заморозки начинаются при сравнительно высоких среднесуточных

температурах в начале сентября. Переход устойчивой температуры через 0°C отмечается весной в начале мая, а осенью — в двадцатых числах сентября. Ледовый режим Куандо-Чарских озер формируется в условиях резко континентального климата с затяжной холодной зимой. За счет особенностей рельефа, разнообразия климатических, почвенно-геологических и мерзлотных условий, с вертикальной поясностью, на реках часто наблюдаются такие особенности ледового режима, как наледи, полыньи и промерзания. Образование льда на озёрах начинается в начале октября. Устойчивый ледяной покров обычно устанавливается во второй или третьей декаде октября. Продолжительность ледостава составляет примерно 215–250 дней. Вскрытие водоёмов происходит в апреле, а полное таяние льда — в мае или июне [16].

3. Описание одномерной гидрофизической модели

Основой разработанной методики нахождения средней глубины водоема является гидрофизическая модель озера FLake¹, разработанная совместными усилиями сотрудников Института озероведения РАН, Института водных проблем Севера РАН, Института водной экологии и внутреннего рыбоводства Германии (IGB) и Службы погоды Германии (DWD) [25–27]. Модель представляет собой универсальную параметризованную одномерную математическую модель ГТД процессов в озере, в которой реализованы результаты исследований, полученные в ходе многолетних натурных и лабораторных исследований, выполненных на Лимнологической станции Института озероведения РАН, а также последние мировые достижения в области физической лимнологии. В настоящее время FLake служит базовым инструментом для разработки моделей функционирования водных экосистем и формирования качества воды в природных и искусственных водоемах, используется как учебное пособие при подготовке специалистов экологов и гидрометеорологов. В качестве метода учета влияния озер на формирование локальных климатических условий широко внедрена в практику численного прогноза погоды в метеорологических организациях разных стран и Международного Европейского Центра среднесрочных прогнозов погоды [28]. Кроме того, прогностическая система COSMO², используемая и в нашей стране для составления прогнозов погоды на всей территории РФ, также включает FLake в качестве средства оценки влияния пресноводных озер на локальный климат по всему миру. Из этого следует, что модель априори может использоваться на неизученных малых и средних водоемах озерных регионов, рассматриваемых в настоящей работе.

На рис. 2 схематично представлено вертикальное распределение температуры в системе снег — лед — водная масса — донные отложения, временная динамика которого рассчитывается в модели.

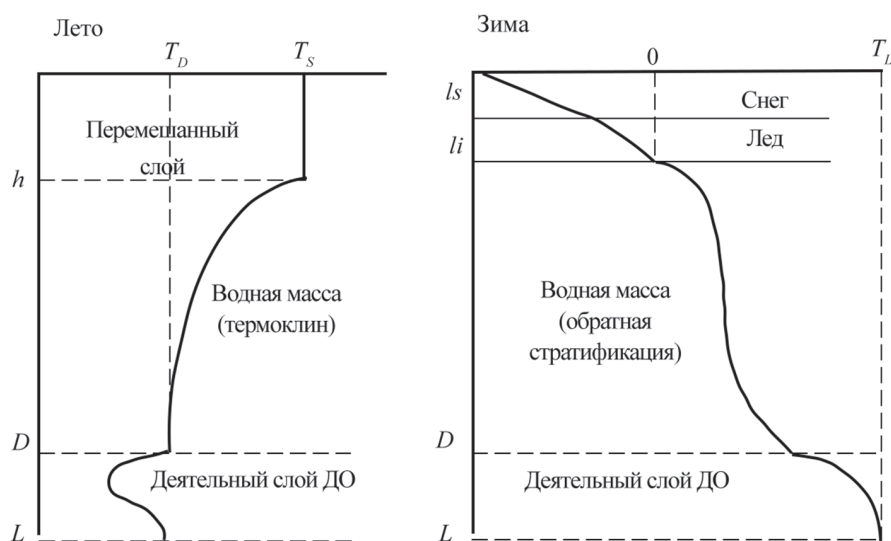


Рис. 2. Схема вертикального профиля температуры (T) в системе снег — лед — водная масса — донные отложения, реализованная в модели FLake

Fig. 2. Scheme of the vertical profile of temperature (T) in the system snow — ice — water mass — bottom sediments, realised in the FLake model

¹ ГТД модель Flake. <https://www.lakemodel.net> (дата обращения 15.03.2024).

² Прогностическая система COSMO, Росгидромет. <https://www.meteorf.gov.ru/product/cosmo/> (дата обращения 15.03.2024).

В соответствии с рис. 2 озеро в модели имеет трехслойную структуру. В период открытой воды («Лето») сверху находится верхний перемешанный слой (ВПС) толщиной h . ВПС из-за постоянно присутствующего ветрового/конвективного перемешивания имеет одинаковую по глубине температуру T_s . Ниже ВПС располагается зона термоклина толщиной $D-h$. В термоклине температура воды уменьшается до значения T_D — температуры воды на границе раздела «вода — дно». При этом водная масса озера имеет устойчивую плотностную стратификацию, что препятствует проникновению перемешивания, а вместе с ним и тепла в придонную область.

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

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

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

Основной особенностью применения модели к озерам, расположенным в зонах залегания многолетне-мерзлых пород — «вечной мерзлоты» — является то, что деятельным слоем донных отложений становится так называемый слой сезонного оттаивания (ССО), который не является постоянной величиной и испытывает выраженные сезонные колебания. В период летнего прогрева он увеличивается за счет поступления тепла из атмосферы через водную массу, тогда как в зимний период ССО деградирует за счет отдачи тепла в воду. Таким образом величина L (рис. 2) становится дополнительной переменной модели. В ходе выполнения настоящей работы модель FLake была дополнена уравнением для расчета толщины деятельного слоя донных отложений — в данном случае толщины ССО [29].

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

- протяженность не должна быть настолько велика, чтобы породить значительные климатические различия между отдельными участками акватории (следствие одномерности модели) и не настолько мала, чтобы вторичные эффекты ветрового воздействия, например, трение о берега или сейши, играли очень существенную роль в вертикальном перемешивании основной массы водоема;

- дно должно быть более или менее ровным и горизонтальным, чтобы его можно было аппроксимировать горизонтальной плоскостью. Данное ограничение применимости модели вызвано необходимостью исключить из рассмотрения наличие склоновых бароклинных течений, способных приводить к образованию придонных пограничных слоев, которые модель не способна воспроизводить вследствие автомодельного представления профиля температуры;

- адвективные процессы не должны вносить существенного вклада в турбулентное перемешивание. Другими словами, в водоеме не должно быть постоянных течений, способных вносить существенный вклад в ветровое перемешивание.

4. Входные данные для модели FLake

Для задания атмосферного воздействия («форсинга») при моделировании ТГД процессов в озерах в настоящей работе использовались данные метеорологического реанализа семейства ERA5, представляющий собой ряды восстановленных значений метеорологических параметров для всего земного шара,

которые обновляются ежедневно с задержкой около 5-ти дней. ERA5 — это пятое поколение реанализа для глобального климата и погоды за последние 8 десятилетий. Данные реанализа охватывают период с 1940 г. по настоящее время. ERA5 предоставляет почасовые оценки для большого числа параметров атмосферы, океанических волн и поверхности земли. Временной шаг между сроками «наблюдений» составляет 6 ч, пространственное разрешение реанализа — $0,25^\circ$ по широте и долготе. Выборка необходимых для расчетов данных производится по координатам расчетной точки. Для облегчения работы многих климатических приложений рассчитываются также и среднемесячные значения гидрометеорологических параметров.

Для определения начала ледовых явлений на выбранных группах озер использовались спутниковые снимки Sentinel-2, Landsat-7 (ETM+) Landsat-8 (OLI), Landsat-9 (OLI-2) за период 2016–2023 гг. Для автоматического определения наличия льда на исследуемых объектах за многолетний период был написан скрипт на платформе обработки геопространственных данных Google Earth Engine [30]. Алгоритм выполнения скрипта сводится к следующим шагам:

- на вход подаются координаты анализируемой территории и исследуемый временной интервал;
- проводится фильтрация набора данных Dynamic World V1 [31] по временному интервалу и координатам;
- из набора данных выбирается полоса, отвечающая за определенный класс подстилающей поверхности. Для задач настоящего исследования — это снег и лед;
- формируется временной ряд, отображающий изменение вероятности класса подстилающей поверхности для заданного местоположения и временного периода.

Анализ временного ряда позволил выделить интервалы времени в различные годы начала ледовых явления на площади водной поверхности озера. Экспертный анализ спутниковых снимков производился на основе обнаружения снежного покрова и льда по нормализованному разностному индексу снежного покрова (Normalized Difference Snow Index, NDSI) [32], а также в различных комбинациях каналов спутниковых снимков. Для наиболее надежного распознавания снега и льда на водной поверхности озер использовались комбинации каналов в ближней и средней инфракрасной и в одной из видимой частей спектра (голубой и красный) [33, 34].

5. Методика оценки средних глубин озер

Предлагаемая методика определения средней глубины озера с использованием дистанционной информации о динамике ледостава основана на утверждении, что скорость замерзания озера является объективным показателем объема водной массы в водоеме, т. е. фактически его средней глубины при фиксированной площади акватории. Основные этапы выполнения расчетов средней глубины следующие:

1. Определяются географические координаты точки расположения водоема.
2. С использованием модели FLake и метеоданных реанализа для координат выбранной точки расположения объекта выполняется серия расчетов времени ледостава на водоеме при различных значениях его средней глубины. Строится функциональная зависимость средней глубины (H) от даты начала ледостава (t): $H = f(t)$ для каждого года.
3. По данным ДЗЗ или каким-то другим способом оценивается дата или интервал времени замерзания акватории водоема.
4. Если дату установления льда на озере удастся определить с точностью до суток, то по зависимости $H = f(t)$ для конкретного года рассчитывается значения его средней глубины (H_{FLake}) (рис. 3). При наличии данных за несколько лет, глубина водоема уточняется осреднением значений для каждого года.
5. При дискретности спутниковых снимков с интервалом в несколько суток возможно определить только диапазон средних глубин озера, соответствующий промежутку времени между пролетами спутника над водоемом, в котором появился ледовый покров. Для усечения этого интервала можно использовать данные за несколько лет. Конечный интервал возможных дат начала ледостава — это пересечение всех полученных за несколько лет интервалов. В этом случае средняя глубина озера определяется по середине усеченного интервала.
6. Применимость методики имеет ограничение не только по горизонтальным размерам водоема (см. выше), но также зависит от глубины водного объекта. Результаты дополнительных расчетов для глубин до 1000 м (средняя глубина оз. Байкал составляет ~ 750 м) показали, что примерно с глубины 200 м дата замерзания перестает зависеть от глубины водоема — после монотонного роста в диапазоне глубин 0–200 м кривая зависимости выходит на асимптоту (рис. 3).

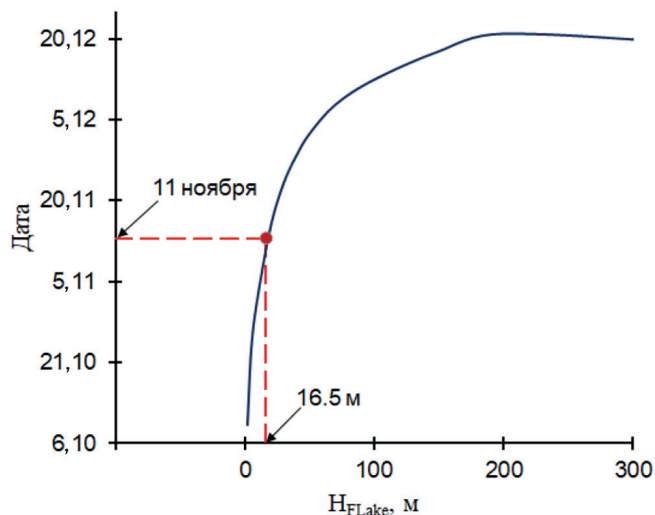


Рис. 3. Определение средней глубины озера по установленной дате образования ледяного покрова на примере озера Баунт в 2018 г.

Fig. 3. Determination of average lake depth by established date of ice cover formation using Lake Baunt as an example in 2018

6. Результаты и обсуждение

Очевидно, что точность оценки средней глубины по изложенной методике повышается при более частых спутниковых съёмках акватории озера и, соответственно, точнее оценивается момент наступления ледостава. Отсюда следует ограничение на частоту спутниковых снимков — за промежуток времени между двумя последовательными пролётами спутника над водным объектом, на последнем должен начаться ледостав.

На рис. 4 проиллюстрирована работа методики при совмещении рассчитанных интервалов оценки средней глубины озера Арахлей ($52^{\circ}12'25,2''$ с.ш., $112^{\circ}52'50,7''$ в. д.) по спутниковым снимкам за 2018 и 2020 гг.

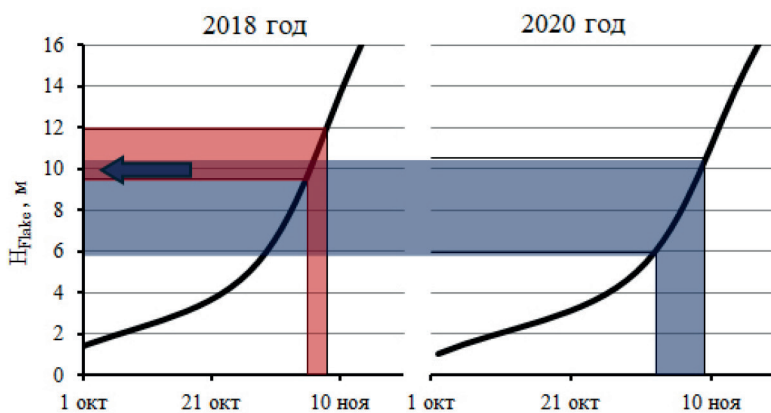


Рис. 4. Графическое представление определения интервалов значений средней глубины озера Арахлей по интервалу дат замерзания в 2018 и 2020 гг., определенного по спутниковым снимкам

Fig. 4. Graphical representation of the determination of the intervals of values of the average depth of Lake Arakhlei by the interval of freezing dates in 2018 and 2020 determined from satellite images

В 2018 г. две последовательные спутниковые съёмки озера Арахлей, на одной из которых наблюдалась водная поверхность, а на другой уже появился ледостав, имели место 5 и 8 ноября. Таким образом, можно

Дистанционная оценка глубины водоемов по дате начала ледостава с использованием гидрофизической модели
Remote Estimation of Water Body Depth Based on the Date of the Beginning of Ice Formation Using a Hydrophysical Model

сказать, что ледостав на водоеме начался в указанный интервал дат. В этом случае в соответствии с рассчитанной по модели FLake кривой $H = f(t)$ значение глубины озера находится в интервале от 9,5 до 11,9 м (рис. 3). Аналогично в 2020 г. можно определить промежуток времени образования ледяного покрова со 2 по 9 ноября, что соответствует диапазону глубин 5,9–10,9 м. Усеченный диапазон –средней глубины озера Арахлей находим как пересечение диапазонов, полученных за все года, и он составляет 9,5–10,9 м. Соответственно рассчитанная глубина озера определяется как среднее и равна 10,2 м. При этом значение средней глубины озера, рассчитанное по данным контактных измерений, составляет 10,4 м. В табл. 2 и на рис. 5 представлены результаты сравнения глубин изучаемых озер, рассчитанных по модели FLake и по данным контактных измерений.

Таблица 2

Table 2

Сравнение средних глубин рассматриваемых озер, рассчитанных по модели (H_{FLake} , м), и полученных в ходе контактных промеров (H_{avg} , м)

Comparison of average lake depths derived from the FLake model (H_{FLake} , m) and from in situ bathymetric measurements (H_{avg} , m) for the studied lakes

Озеро	H_{avg} , м	H_{FLake} , м	Δ , м	δ , %
Баунт	17,0	16,5	0,5	2,9
Ивано-Арахлейские озера				
Иргень	1,8	2,0	–0,2	–11,1
Б. Ундугун	2,1	2,0	0,1	4,8
Шакшинское	4,4	5,0	–0,6	–13,6
Арахлей	10,4	10	0,4	3,8
Иван	3,1	3,5	–0,4	–12,9
Тасей	2,1	2,0	0,1	4,8
Куандо-Чарские озера				
Б. Леприндо	25,0	23,0	2,0	8,0
М. Леприндо	30,0	28,0	2,0	6,7
Леприндокан	8,6	8,0	0,6	7,0
Довочан	33,0	30,0	3,0	9,1
Еравнинские озера				
Сосновое	2,8	3,0	–0,2	–7,1
Б. Еравное	3,5	4,0	–0,5	–14,3
М. Еравное	1,8	2,0	–0,2	–11,1
Аршан	1,5	1,5	0,0	0,0
Гунда	3,5	4,0	–0,5	–14,3
М. Харга	1,4	1,0	0,4	28,6
Б. Харга	1,5	1,5	0,0	0,0
Исинга	2,7	3,0	–0,3	–11,1
Щучье	5,3	6,0	–0,7	–13,2
Озера Амутской котловины				
Амут	12	14,0	–2,0	–16,7
Якондыкон	7,0	6,5	0,5	7,1
Балан-Тамур	2,0	2,0	0,0	0,0
Зурхен	6,0	5,5	0,5	8,3
Чуритко	2,0	2,0	0,0	0,0

Примечание: Δ — абсолютная ошибка, δ — относительная ошибка.

На основании полученных результатов можно сделать вывод об удовлетворительном соответствии данных о средней глубине, полученной в ходе промера глубин водоема и рассчитанной по модели FLake. Средняя абсолютная ошибка расчетов составляет 0,65 м, средняя относительная ошибка –9,0 %. Имеющиеся небольшие несоответствия рассчитанных и измеренных значений средней глубины (до 5 %) объясняется тем, что замерзание некоторых акваторий может происходить неравномерно в течении нескольких суток. Таким образом нарушаются условия применимости одномерной модели для всего озера.

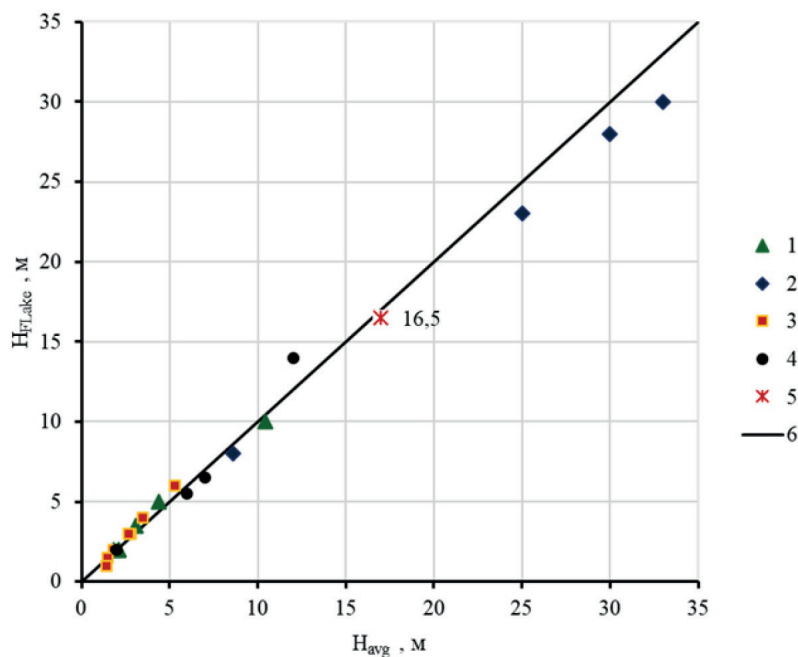


Рис. 5. Сравнения значений средних глубин озёр, рассчитанных по модели FLake (H_{FLake} , м) и полученных в ходе контактных промеров (H_{avg} , м). Группы озёр обозначены различными знаками: 1 — Ивано-Арахлейские, 2 — Куандо-Чарские, 3 — Еравнинские, 4 — Амутской котловины, 5 — оз. Баунт, линия 6 — функция идеального расчета

Fig. 5. Comparison of mean lake depths calculated using the FLake model (H_{FLake} , m) and obtained from in situ measurements (H_{avg} , m). Lake groups are indicated by different symbols: 1 — Ivano-Arakhley group, 2 — Kuanda-Chara group, 3 — Yeravna group, 4 — Amut Basin, 5 — Lake Baunt; line 6 represents the 1:1 reference (ideal agreement) line

7. Заключение

Проведенное исследование подтвердило перспективность дальнейшего развития методики оценки средней глубины озера на основе дистанционной информации динамике ледостава с использованием методов моделирования ТГД процессов в замерзающем водоеме. Одним из перспективных направлений использования разработанной методики является полностью дистанционная оценка водных ресурсов и их временной динамики для труднодоступных или обширных территорий. Настоящую методику можно усовершенствовать за счет включения в неё других термических характеристик водоёмов, которые можно определить по спутниковым данным, например, температуру поверхности. Это позволит использовать разработанную методику определения средних глубин не только для северных замерзающих озёр, но и для регионов с положительными среднегодовыми температурами.

Точность предложенной методики ограничена качеством и количеством спутниковых снимков. В частности, при высокой облачности в регионе исследований, при обработке снимков невозможно с достаточной точностью разделить лед и облака. Также зачастую случаются поломки спутниковых сенсоров. Очевидно, что такие спутниковые снимки непригодны для определения ледовых явлений на водоемах. Для повышения точности определения даты начала ледостава следует увеличить частоту съемки исследуемого региона в приблизительные даты ледостава, а также расширить период всех наблюдений.

Применение методики имеет ряд других ограничений как в части применимости одномерной модели, так и в части, касающейся глубины рассматриваемых водоемов. В частности, модель FLake в силу своей одномерности не может быть применена к водным объектам, в пределах которых может существовать пространственная климатическая изменчивость гидрофизических характеристик. Кроме того, как было показано в ходе выполнения настоящей работы, с определенной глубины (~200 м, см. рис. 3) дата замерзания водоема перестает зависеть от его глубины, и применение методики теряет свой смысл.

Перспективы практического использования разработанной методики заключаются в возможности полностью дистанционной оценки медленно возобновляемых водных ресурсов в различных природных зонах нашей страны с большим количеством неизученных и малоизученных водных объектов. Также несомненным преимуществом разработанной методики определения средних глубин малых и средних озёр является её низкая стоимость по сравнению с современным оборудованием для батиметрической съёмки.

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-27-00067).

Funding

This work was supported by the Russian Science Foundation (project No 24-27-00067).

Литература

1. Измайлова А.В. Водные ресурсы озер Российской Федерации // География и природные ресурсы. 2016. № 4. С. 5–14. doi:10.21782/GIPR0206-1619-2016-4(5-14) EDN: XENPIR
2. Рянжин С.В. Новые оценки глобальной площади и объема воды естественных озер мира // Доклады Академии наук. 2005. Т. 400, № 6. С. 808–812. EDN: OOOITP
3. Сало Ю.А., Потахин М.С., Толстиков А.В. Расчет средней глубины озер Карелии при отсутствии батиметрических данных // Известия Русского географического общества. 2010. Т. 142, № 3. С. 47–52. EDN: OJHYOV
4. Messenger M.L., Lehner B., Grill G., Nedeva I., Schmitt O. Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach // Nature Communications. 2016. Vol. 7. P. 13603. doi:10.1038/ncomms13603 EDN: YWLZJD
5. Khazaei B., Read L.K., Casali M. et al. GLOBathy, the global lakes bathymetry dataset // Scientific Data. 2022. Vol. 9. P. 36. doi:10.1038/s41597-022-01132-9 EDN: MDSODY
6. Håkanson L. On lake form, lake volume and lake hypsographic survey // Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography. 1977. Vol. 59, No. 1–2. P. 1–29.
7. Кочков Н.В., Рянжин С.В. Методика оценки морфометрических характеристик озер с использованием спутниковой информации // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 1. С. 18–27. doi:10.7868/S0321059616010107 EDN: VCPprt
8. Stumpf R.P., Holderied K., Sinclair M. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types // Limnology and Oceanography. 2003. Vol. 48, part 2. P. 547–556. doi:10.1007/978-981-15-6106-1_14
9. Wen K. et al. Satellite-Based Water Depth Estimation: A Review // Geoinformatics in Sustainable Ecosystem and Society. GSES GeoAI 2019. Communications in Computer and Information Science. 2020. Vol. 1228. P. 177–195. doi:10.1007/978-981-15-6106-1_14
10. Johansson H., Brolin A.A., Håkanson L. New approaches to the modelling of lake basin morphometry // Environ Model Assess. 2007. Vol. 12. P. 213–228. doi:10.1007/s10666-006-9069-z EDN: YONUKG
11. Базарова Б.Б. Флористический состав и пространственная структура водной растительности озер Еравно-Харгинской системы (Бурятия) // Экосистемы. 2018. № 13(43). С. 3–12. EDN: XORWV
12. Нестерева М.И. Морфометрические показатели наиболее крупных и значимых озёр Бурятии // Молодой ученый. 2014. № 14. С. 81–83. EDN: SMMSIB
13. Шевелева Н.Г. Зоопланктон водоемов Джергинского заповедника (Восточная Сибирь) // Научные труды Государственного природного заповедника «Присурский». 2015. Т. 30, № 1. С. 279–283. EDN: VHNAKN
14. Просекин К.А., Просекина А.А. Гидрологическая характеристика водоемов и водотоков заповедника Джергинский как среды обитания гидробионтов // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2009. Т. 18, № 2. С. 149–154. EDN: PFNWAT
15. Матафонов П.В., Шойдоков А.Б., Матюгина Е.Б. и др. Влияние открытости Ивано-Арахлейских озер на формирование в них донных ландшафтов в экстремально маловодный период // Успехи современного естествознания. 2023. № 12. С. 115–120. doi:10.17513/use.38180 EDN: FQMqAN
16. Материалы комплексного эколого-экономического обследования территории, обосновывающие необходимость обеспечения статуса особо охраняемой природной территории федерального значения — национальный парк «Кодар» в Каларском районе Забайкальского края. Том 1. Эколого-экономическое обоснование национального парка «Кодар». Чита: ИПРЭК СО РАН, 2016. 479 с.
17. Софронов А.П., Владимиров И.Н., Кобылкин Д.В. Структура растительного покрова Амутской котловины (Джергинский заповедник, Республика Бурятия) // Геоботаническое картографирование. 2023. № 2023. С. 48–57. doi:10.31111/geobotmap/2023.48 EDN: AIRYZE

18. Суховнина В.О., Шевелева Н.Г. Cyclops scutifer Sars, 1863 в водоемах юга Восточной Сибири (морфология и распространение) // Экологический сборник 6: труды молодых ученых Поволжья: Международная молодежная научная конференция. Тольятти: Кассандра, 2017. С. 366–369. EDN: ZIHOKF
19. Солотчина Э.П., Скляров Е.В., Солотчин П.А. и др. Аутигенное карбонатообразование в озерах Еравнинской группы (Западное Забайкалье): отклик на изменения климата голоцена // Геология и геофизика. 2017. Т. 58, № 11. С. 1749–1763. doi:10.15372/GiG20171109 EDN: ZXFVKZ
20. Плюснин А.М., Перязева Е.Г. Гидрологические и гидрохимические особенности озер Еравнинской котловины // География и природные ресурсы. 2012. № 2. С. 67–73. EDN: KMSRMD
21. Борзенко С.В., Замана Л.В. Гидрогеохимия Ивано-Арахлейских озер // Геосферные исследования. 2020. № 3. С. 69–79. doi:10.17223/25421379/16/6 EDN: PЕНHDC
22. Голятина М.А. Оценка динамики площадей водной поверхности Ивано-Арахлейских озер с помощью космического мониторинга // Водные ресурсы и водопользование: сборник трудов. Том Выпуск 8. Чита: Забайкальский государственный университет, 2017. С. 107–114. EDN: YLEOOQ
23. Обязов В.А. Гидрологический режим озер Забайкалья в условиях меняющегося климата (на примере Ивано-Арахлейских озер) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2011. № 3. С. 4–14. EDN: OAKIBL
24. Кривенкова И.Ф. Зоопланктон в озёрах Малое и Большое Леприндо // Ученые записки Забайкальского государственного университета. 2016. Т. 11, № 1. С. 81–85. EDN: OAKIBL
25. Golosov S., Kirillin G. A parameterized model of heat storage by lake sediments // Environmental Modelling & Software. 2010. Vol. 25, No 6. P. 793–801. doi:10.1016/j.envsoft.2010.01.002 EDN: MXCLOUD
26. Kirillin G., Hochschild J., Mironov D. et al. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage // Environmental Modelling & Software. 2011. Vol. 26, No 5. P. 683–684. doi:10.1016/j.envsoft.2010.12.004 EDN: OHQYWB
27. 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. P. 218–230. IEDN: MXKEUF
28. Mironov D.V. Parameterization of Lakes in Numerical Weather Prediction. Description of a Lake Model // COSMO Technical Report. No. 11. Offenbach am Main: German Weather Service, 2008. 44 p.
29. Zdorovenkov R., Golosov S., Zverev I. et al. Arctic climate variability and ice regime of the Lena River delta lakes // E3S Web of Conferences (IV Vinogradov Conference). 2020. Vol. 163. P. 04008. doi:10.1051/e3sconf/202016304008 EDN: MFJCSZ
30. Google Earth Engine. URL: <https://code.earthengine.google.com/> (дата обращения 19.09.2024).
31. Brown C.F., Brumby S.P., Guzder-Williams B. et al. Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping // Scientific Data. 2022. Vol. 9. P. 251. doi:10.1038/s41597-022-01307-4 EDN: JMDVIP
32. Riggs G., Hall D., Salomonson V. A snow index for the Landsat Thematic Mapper and Moderate Resolution Imaging Spectrometer // Proceeding of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '94, Vol. 4: Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis, and Interpretation. Pasadena, 1994. P. 1942–1944. doi:10.1109/IGARSS.1994.399618
33. Адамович Т.А., Ашихмина Т.Я., Кантор Г.Я. Использование различных комбинаций спектральных каналов космических снимков спутника Landsat 8 для оценки природных сред и объектов (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 2. С. 9–18. EDN: ZHBHAT
34. Степанов С.Ю., Петров Я.А., Вагизов М.Р., Сидоренко А.Ю. Мониторинг данных дистанционного зондирования Земли по данным спутника Landsat // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2020. № 1(37). С. 206–216. EDN: GXKATJ

References

1. Izmailova AV. Water resources of lakes in the Russian Federation. *Geografiya i prirodnyye resursy*. 2016, 4, 5–14. (in Russian).
2. Ryanzhin SV. New estimates for global surface area and volume of natural world lakes. *Doklady Earth Sciences*. 2005, 401(2), 253–257.
3. Salo Yu A, Potakhin M.S., Tolstikov A.V. Calculation of the average depth of lakes in Karelia in the absence of bathymetric data. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*. 2010, 142(3), 47–52. (in Russian)
4. Messenger ML, Lehner B, Grill G, Nedeva I, Schmitt O. Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach. *Nature Communications*. 2016, 7: 13603. doi: 10.1038/ncomms13603
5. Khazaei B, Read LK, Casali M. et al. GLOBathy, the global lakes bathymetry dataset. *Scientific Data*. 2022, 9: 36. doi: 10.1038/s41597-022-01132-9
6. Håkanson L. On lake form, lake volume and lake hypsographic survey. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*. 1977, 59(1–2), 1–29.

7. Kochkov NV, Ryanzhin SV. Methodology of estimation of morphometric characteristics of lakes using satellite information. *Water Resources*. 2016, 43(1), 15–20. doi 10.7868/S0321059616010107.
8. Stumpf RP, Holderied K, Sinclair M. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*. 2003, 48(2), 547–556. doi: 10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547
9. Wen K. et al. Satellite-Based Water Depth Estimation: A Review. *Geoinformatics in Sustainable Ecosystem and Society. GSES GeoAI 2019. Communications in Computer and Information Science*. 2020, 1228, 177–195. doi: 10.1007/978-981-15-6106-1_14
10. Johansson H, Brodin AA, Håkanson L. New Approaches to the Modelling of Lake Basin Morphometry. *Environ Model Assess*. 2007, 12, 213–228. doi: 10.1007/s10666-006-9069-z
11. Bazarova VV. Floristic composition and spatial structure of aquatic vegetation of lakes Yeravno-Khargin system (Buryatia). *Ekosistemy*. 2018, 13(43), 3–12. (in Russian).
12. Nestereva MI. Morphometric indicators of the largest and most significant lakes of Buryatia. *Molodoy uchenyy*. 2014, 14, 81–83. (in Russian).
13. Sheveleva NG. Zooplankton of water bodies of the Jerginsky Reserve (Eastern Siberia). *Nauchnyye trudy Gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika "Prisurskiy"*. 2015, 30(1), 279–283. (in Russian).
14. Prosekin KA, Prosekina AA. Hydrological characterisation of water bodies and watercourses of the Djerginsky Reserve as a habitat for hydrobionts. *Samarskaya Luka: problemy regional'noy i global'noy ekologii*. 2009, 18(2), 149–154. (in Russian)
15. Matafonov PV, Shoidokov AB, Matyugina EB. et al. Influence of Ivano-Arachleysk lakes openness on the formation of bottom landscapes in them during the extreme low-water period. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*. 2023, 12, 115–120. (in Russian). doi: 10.17513/use.38180.
16. Materials of the complex ecological and economic survey of the territory, justifying the need to ensure the status of a specially protected natural area of federal significance — the national park 'Kodar' in the Kalar district of the Zabaikalsky Krai. Volume 1: Ecological and economic substantiation of the Kodar National Park. Chita: IPREC SB RAS, 2016. 479 p. (in Russian).
17. Sofronov AP, Vladimirov IN, Kobylkin DV. Structure of the vegetation cover of the Amutskaya Basin (Djerginsky Reserve, Republic of Buryatia). *Geobotanicheskoye kartografirovaniye*. 2023, 2023, 48–57. (in Russian). doi: 10.31111/geobotmap/2023.48
18. Sukhovnina VO, Sheveleva NG. Cyclops scutifer Sars, 1863 in the water bodies of southern Eastern Siberia (morphology and distribution) // Ecological Collection 6: Proceedings of young scientists of the Volga region: International Youth Scientific Conference. Togliatti: Cassandra, 2017, 366–369. (in Russian).
19. Solotchina EP, Sklyarov EV, Solotchin PA, et al. Authigenic carbonate formation in lakes of the Yeravninskaya group (Western Transbaikalia): response to Holocene climate changes. *Geologiya i geofizika*. 2017, 58(11), 1749–1763. (in Russian). doi: 10.15372/GiG20171109
20. Plusnin AM, Peryazeva EG. Hydrological and hydrochemical features of lakes in the Yeravninskaya Basin. *Geography and Natural Resources*. 2012, 2, 67–73. (in Russian).
21. Borzenko SV, Zamana LV. Hydrogeochemistry of the Ivano-Arachleyskoye lakes. *Geosfernye Issledovaniya*. 2020, 3, 69–79. (in Russian). doi: 10.17223/25421379/16/6.
22. Golyatina MA. Estimation of the dynamics of water surface areas of Ivano-Arachleyskiy lakes using space monitoring. *Water resources and water use: collection of works. Volume Issue 8. Chita: Transbaikal State University*, 2017, 107–114. (in Russian).
23. Obyazov VA. Hydrological regime of lakes in Transbaikalia under the changing climate (on the example of Ivano-Arachleysk lakes). *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye*. 2011, 3, 4–14. (in Russian).
24. Krivenkova IF. Zooplankton in lakes Maloye and Bolshoye Leprindo. *Uchenyye zapiski Zabaykal'skogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016, 11(1), 81–85. (in Russian).
25. Golosov S, Kirillin G. A parameterized model of heat storage by lake sediments. *Environmental Modelling & Software*. 2010, Vol. 25(6), 793–801. doi: 10.1016/j.envsoft.2010.01.002
26. Kirillin G, Hochschild J, Mironov D. et al. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage. *Environmental Modelling & Software*. 2011, 26(5), 683–684.
27. 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, 15, 218–230.
28. Mironov DV. Parameterization of Lakes in Numerical Weather Prediction. Description of a Lake Model / COSMO Technical Report. No. 11. Offenbach am Main: German Weather Service, 2008. 44 p.
29. Zdorovenov R, Golosov S, Zverev I. et al. Arctic climate variability and ice regime of the Lena River delta lakes. *E3S Web of Conferences (IV Vinogradov Conference)*. 2020, 163, 04008. doi: 10.1051/e3sconf/202016304008

30. Google Earth Engine. URL: <https://code.earthengine.google.com/> (Accessed 19.09.2024).
31. Brown CF, Brumby SP, Guzder-Williams B. et al. Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. *Scientific Data*. 2022, 9, 251. doi: 10.1038/s41597-022-01307-4
32. Riggs G, Hall D, Salomonson V. A snow index for the Landsat Thematic Mapper and Moderate Resolution Imaging Spectrometer. *Proceeding of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '94, Vol. 4: Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis, and Interpretation. Pasadena*, 1994, 1942–1944.
33. Adamovich TA, Ashikhmina TY, Kantor GY. Use of different combinations of spectral channels of Landsat 8 satellite images for assessment of natural environments and objects (review). *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2017, 2, 9–18. (in Russian).
34. Stepanov SYu, Petrov YA, Vagizov MR, Sidorenko AYu. Monitoring of Earth remote sensing data using Landsat satellite data. *Informatsionnyye tekhnologii i sistemy: upravleniye, ekonomika, transport, pravo*. 2020, 1(37), 206–216. (in Russian).

Об авторах

КОНДРАТЬЕВ Сергей Алексеевич, главный научный сотрудник ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН, доктор физико-математических наук, ORCID: 0000-0003-1451-8428, Scopus AuthorID: 55929551100, WoS ResearcherID: AAN-9826–2020, SPIN-код (РИНЦ): 1145-3646, e-mail: kondratyev@limno.org.ru

ГОЛОСОВ Сергей Дмитриевич, старший научный сотрудник ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0002-4687-0621, Scopus AuthorID: 9039511000, WoS ResearcherID: J-7376–2018, SPIN-код (РИНЦ): 9712-4011, e-mail: sergey_golosov@mail.ru

ЗВЕРЕВ Илья Сергеевич, старший научный сотрудник ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0003-0829-6881, Scopus AuthorID: 6803201200, WoS ResearcherID: J-4888–2018, SPIN-код (РИНЦ): 4634-8770, e-mail: iliazverev@mail.ru

РАСУЛОВА Анна Мурадовна, научный сотрудник ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0003-4400-2000, Scopus AuthorID: 55347712100, WoS ResearcherID: R-8815–2016, SPIN-код (РИНЦ): 3888-6462, e-mail: arasulova@limno.ru