



Научная статья

УДК 556

EDN: RWHVLN

DOI: 10.21285/2686-9993-2026-49-2-4



Анализ многолетних изменений ледовой обстановки на озере Кулинда в апреле с использованием данных с космических спутников Landsat-8 и Landsat-9

М. Гу^a, С. Мэн^b, В.М. Жуликов^c, В.Л. Рупосов^d

^{a,b}Хэнаньский политехнический университет, Цзяоцзо, Китай

^{c,d}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация

Резюме. Ледовая обстановка озер служит индикатором региональных климатических изменений. В данном исследовании рассматривается оз. Кулинда, расположенное в северной оконечности оз. Байкал в России. В исследовании проанализированы закономерности таяния льда на этом озере в апреле 2019, 2021, 2023 и 2025 гг. и выявлены факторы, влияющие на эволюцию ледяных озер в рассматриваемом регионе с использованием данных дистанционного зондирования спутниками Landsat-8 и Landsat-9 и инструментов геоинформационной системы анализа. Полученные результаты показывают, что в период с 2019 по 2025 г. площадь ледяного покрова оз. Кулинда уменьшилась с 9,17 до 8,86 км², что составляет суммарное сокращение на 0,31 км² при среднем годовом уменьшении 0,05 км². Скорость таяния льда сначала увеличивалась, а затем снизилась. Наибольшее годовое сокращение ледового покрова наблюдалось в период с 2021 по 2023 г. (0,08 км²), тогда как в период с 2023 по 2025 г. скорость снизилась (0,04 км²), что указывает на замедление динамики ледового покрова озера. Отступление ледяного покрова происходило вдоль прибрежных зон, особенно в юго-восточных и северо-западных частях, тогда как центральная часть оставалась покрытой льдом. Граница между ледовым покровом и открытой водой каждый год постепенно смещалась к центру озера. Изменения площади ледяного покрова связаны с потеплением климата в регионе. Фазы быстрого таяния льда в период с 2021 по 2023 г. совпали со статистическим весенним потеплением, а последующее замедление связано с нелинейным взаимодействием между естественными климатическими колебаниями и динамикой ледового покрова. Это свидетельствует об адаптационных возможностях и саморегуляции ледяного покрова озера. Результаты исследований могут быть использованы для мониторинга фенологического состояния образования и разрушения ледового покрова озер Северного Прибайкалья, что будет способствовать лучшему пониманию изменений климата в регионе.

Ключевые слова: озеро Кулинда, фенология ледяного покрова, Landsat-8, Landsat-9, нормализованный разностный индекс снежного покрова, межгодовые вариации

Для цитирования: Гу М., Мэн С., Жуликов В.М., Рупосов В.Л. Анализ многолетних изменений ледовой обстановки на озере Кулинда в апреле с использованием данных с космических спутников Landsat-8 и Landsat-9 // Науки о Земле и недропользование. 2026. Т. 49. № 2. С. ?–?. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-2-4>. EDN: RWHVLN.

Original article

Monitoring interannual variations in ice conditions of Lake Kulinda in April based on Landsat-8 and Landsat-9 time-series imagery

Mengyao Gu^a, Xiangyu Meng^b, Vladimir M. Zhulikov^c, Vitaliy L. Ruposov^d

^{a,b}Henan Polytechnic University, Jiaozuo, China

^{c,d}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The ice conditions of lakes serve as an indicator of regional climate change. This study focuses on Lake Kulinda, located at the northern end of Lake Baikal, Russia. The study analyzes the patterns of ice melting in this lake in April 2019, 2021, 2023, and 2025, and identifies the factors influencing the evolution of ice lakes in this region using Landsat-8 and Landsat-9 remote sensing data and GIS analysis tools. The results show that between 2019 and 2025, the ice cover of Lake Kulinda decreased from 9.17 km² to 8.86 km², resulting in a total reduction of 0.31 km² with an average annual decrease of 0.05 km². The rate of ice melting initially increased and then decreased. The largest annual reduction was observed in the period 2021–2023 (0.08 km²), while in the period 2023–2025 the rate slowed down (0.04 km²), which indicates a slowdown in the dynamics of the lake's ice cover. The retreat of the ice cover occurred along the coastal zones, especially in the southeastern and northwestern parts, while the central part remained covered with ice. The boundary

© Гу М., Мэн С., Жуликов В.М., Рупосов В.Л., 2026



between ice and open water gradually shifted towards the center of the lake every year. Changes in the area of the ice cover are associated with the warming climate of the region. The phases of rapid melting in 2021–2023 coincided with the statistical spring warming, and the subsequent slowdown is related to the nonlinear interaction between natural climate fluctuations and the dynamics of the ice cover. This indicates the adaptive capabilities and self-regulation of the lake's ice cover. The research results can be used in monitoring the phenological state of the ice cover formation in the lakes of the Northern Baikal region, which will contribute to a better understanding of climate change in the region.

Keywords: Lake Kulinda, lake ice phenology, Landsat-8, Landsat-9, normalized difference snow index, interannual variation

For citation: Gu M., Meng X., Zhulikov V.M., Ruposov V.L. Monitoring interannual variations in ice conditions of Lake Kulinda in April based on Landsat-8 and Landsat-9 time-series imagery. *Earth sciences and subsoil use*. 2026;49(2):?-?. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-2-4>. EDN: RWHVLN.

Введение

Глобальное изменение климата в настоящее время привлекает к себе всеобщее внимание. Однако степень влияния человека на этот процесс и его общую тенденцию по-прежнему трудно определить. В связи с этим изучение изменения климата в густонаселенных городских районах помогает оценить влияние деятельности человека на глобальный климат. В то же время наблюдения и записи из малонаселенных регионов важны для дальнейшей оценки влияния человека. Поскольку наземные наблюдения в отдаленных районах затруднены, дистанционное зондирование может использоваться для мониторинга ключевых показателей изменения климата на

расстоянии. Целью данного исследования является анализ долгосрочных изменений ледяного покрова оз. Кулинда с целью выявления тенденций изменения климата. Объектом исследования в данной работе стало оз. Кулинда в Республике Бурятия, Россия. Ближайшим населенным пунктом является с. Кичера, расположенное в 30 км к северу от оз. Байкал, что делает исследуемый район малонаселенным (рис. 1).

Типичный континентальный Байкальский регион характеризуется синхронными изменениями ледовой фенологии, которые проявляются в том, что горные озера, как правило, имеют более короткие периоды ледообразования и меньшие площади ледяного покрова

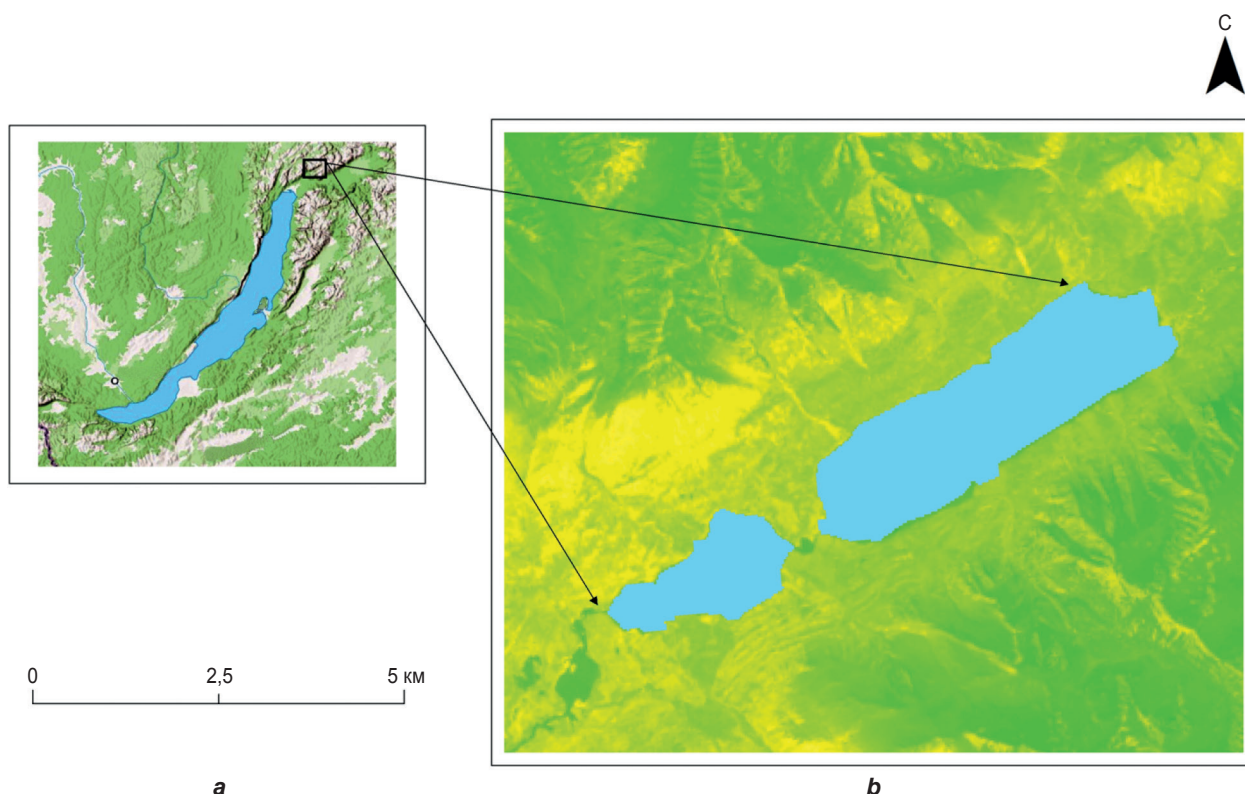


Рис. 1. Район исследования:
а – 56°06' с. ш.; б – 110°29' в. д.

Fig. 1. Study area:
а – 56°06' N; б – 110°29' E



на более ранних сроках [1–3]. Ледовый режим оз. Кулинда наглядно подтверждает тенденцию весенней деградации озерного льда в Байкальском регионе. Следовательно, результаты данного исследования могут быть использованы для получения новых научных данных для изучения эволюции климатических и гидрологических процессов в регионе [4–7]. Учитывая географическое положение и условия оз. Кулинда (рис. 2), спутниковые данные – с их преимуществами в виде среднего пространственного разрешения, мультиспектральных возможностей и удобной визуализации – являются предпочтительным инструментом для мониторинга динамики льда [8–13].

В настоящее время исследования динамики озерного льда в основном сосредоточены на извлечении и анализе их пространствен-

но-временного распределения и физических характеристик. Например, Л.Л. Сухачева [14] проанализировала пространственно-временные вариации ледовой обстановки, процессы образования и таяния льда, а также эволюцию морфологии льда в Финском заливе и Невской губе в 2011–2012 гг. В.М. Колий [15] использовал спутниковые снимки для мониторинга состояния речного льда с апреля 2013 по ноябрь 2017 г. Ж. Ван [16] изучил озера площадью более 100 км² на Тибетском нагорье и их изменения в течение 2000–2015 гг. М. Ци [17], используя данные спутников Terra MODIS и Landsat TM/ETM+, проанализировал характеристики льда на оз. Цинхай с 2000 по 2016 гг., выявив сокращение продолжительности ледяного покрова и определив кумулятивную отрицательную зимнюю температуру как ключевой фактор.

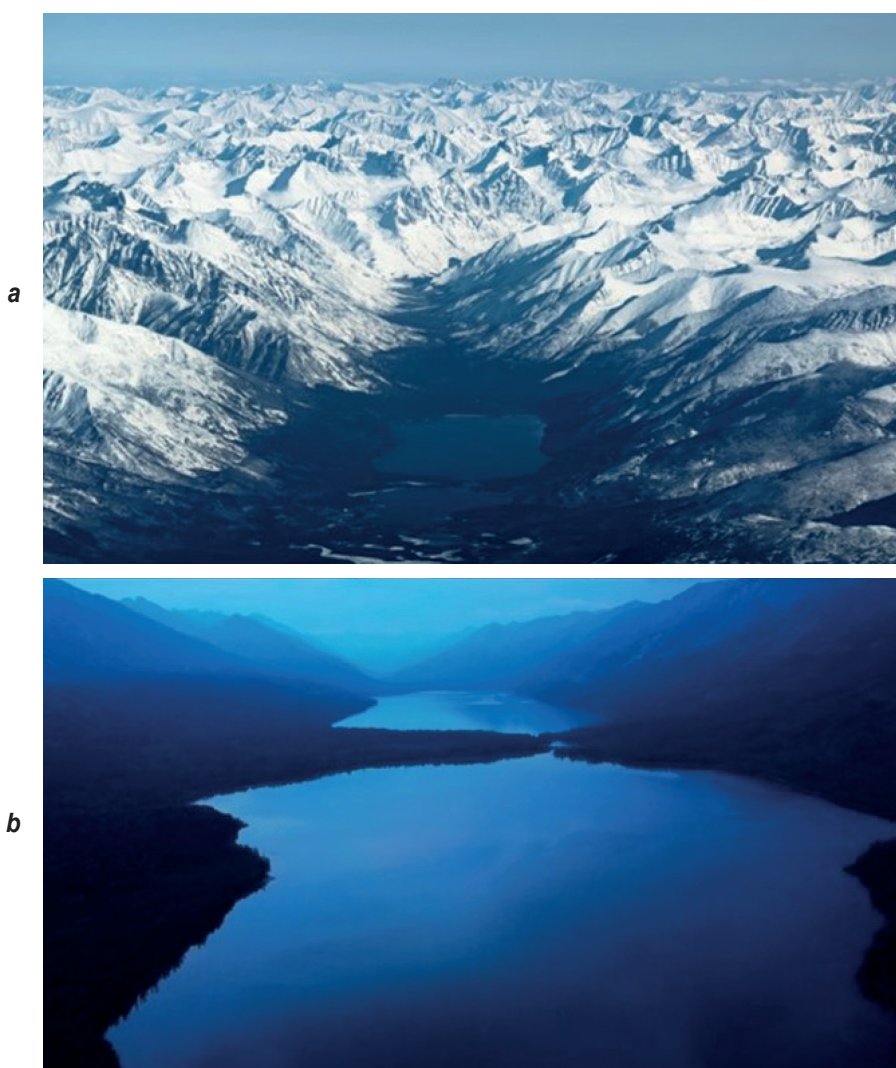


Рис. 2. Фотографии озера Кулинда ранней осенью (a) и летом (b)
Fig. 2. Photos of Lake Kulinda in early autumn (a) and summer (b)



Широтное положение и континентальный климат оз. Кулинда определяют специфическую динамику его ледяного покрова, но данное озеро в этом отношении недостаточно изучено. В представленном исследовании используются спутниковые снимки Landsat-8, Landsat-9 и геоинформационных систем для анализа временных изменений ледяного покрова оз. Кулинда с 2019 по 2025 г., а также факторов, влияющих на эволюцию ледяного покрова в аналогичных регионах. Полученные результаты могут быть использованы при изучении динамики ледяного покрова Центральной Сибири в целом.

Материалы и методы исследования

Озеро Кулинда расположено в засушливой части бассейна Северного Байкала и имеет географические координаты 56°06' с. ш. и 110°29' в. д. (см. рис. 1). Озеро относится к бассейну реки Кичеры и является типичным ледниковым озером, сохранившимся после последнего оледенения. Общая площадь озера составляет 9,21 км² [18, 19]. Озеро вытянутое, с крутыми берегами и прямой береговой линией.

Озеро окружено горами средней высоты (800–1200 м) (см. рис. 2) со следами крупномасштабной ледниковой обработки максимума последнего оледенения: карст, трог, ледниковые долины, боковые, донные и конечные морены. Коренные породы представлены палеозойскими и мезозойскими магматическими и метаморфическими образованиями, частично покрытыми ледниковыми и озерными отложениями. Почвы горно-тундровые и криогенные, с тонким гумусовым слоем и низким плодородием. Растительность типична для территорий Северного Прибайкалья и состоит из тундры, кустарников и редких хвойных лесов.

Климат региона – холодный умеренно континентальный, на который сильно влияют воздушные массы Сибирского антициклона и полярные воздушные массы: долгие, очень холодные зимы и короткое прохладное лето. Среднегодовая температура значительно ниже 0 °С. Средняя температура в январе может опуститься ниже минус 30 °С, а иногда и до минус 45 °С. Средняя температура в июле составляет 10–15 °С, а экстремальные значения не превышают примерно 25 °С. Годовое количество осадков составляет примерно 350–450 мм, в основном в виде снега. Снежный покров сохраняется более семи месяцев (с середины

октября по май). Характерны сильные ветра, особенно зимой, с частыми метелями. Под действием ветра на льду образуются выступы и трещины [20].

Эти суровые условия приводят к длительному периоду ледостава: ледостав обычно начинается в начале ноября и длится до конца мая – около шести месяцев. Максимальная толщина льда достигает 1–1,2 м, при этом локальные колебания обусловлены снежным покровом и перераспределением ветра. Май является критической фазой процесса таяния: повышение температуры и увеличение солнечной радиации запускают процесс таяния вдоль берега и на поверхности льда. Таким образом, анализ межгодовой изменчивости площади льда в мае эффективно отражает влияние потепления климата на региональную криосферу [21].

С гидрологической точки зрения озеро питается в основном за счет атмосферных осадков и таяния снега, а уровень воды в нем относительно стабилен. Вода прозрачная; летом температура на поверхности достигает 10–12 °С [22], в то время как придонные воды остаются неизменными при температуре около 4 °С, образуя двухслойную термальную структуру. Благодаря своей удаленности, антропогенное воздействие минимально и этот район сохраняет естественное, близкое к первозданному состояние, что делает озеро подходящим местом для изучения динамики льда в высоких широтах.

В условиях глобального потепления Сибирь считается одним из наиболее климатически уязвимых регионов, и изменения в ее криосфере вызвали значительный научный интерес. Являясь типичным ледниковым озером в регионе, оз. Кулинда отражает местные климатические тенденции и служит важным ориентиром для понимания гидроклиматических изменений в регионах, похожих на Байкальский регион [23]. Таким образом, глубокий анализ пространственно-временных изменений ледяного покрова озера имеет высокую научную ценность и практическое значение для понимания взаимодействия криосферы и климата в высоких широтах и для прогнозирования будущих изменений.

Результаты исследования и их обсуждение

Нормализованный разностный индекс снега. Нормализованный разностный индекс



снега (NDSI, от англ.: Normalized Difference Snow Index) – это классический метод определения снега и льда на основе спектральных характеристик отражения в определенных диапазонах длин волн.

NDSI использует высокую отражательную способность снега/льда в видимом диапазоне и низкую отражательную способность в коротковолновом инфракрасном диапазоне (SWIR) для различения покрытых льдом и свободных ото льда участков. Он рассчитывается следующим образом:

$$NDSI = \frac{(band3 - band6)}{(band3 + band6)}.$$

NDSI – это нормализованная разница между коэффициентом отражения в полосе зеленого цвета и коротковолновом инфракрасном диапазоне (SWIR1). Для спутников Landsat-8 и Landsat-9 полоса зеленого цвета – это полоса 3 (0,53–0,59 мкм), а SWIR1 – это полоса 6 (1,57–1,65 мкм).

Значения NDSI варьируются от -1 до +1: для снега и льда характерны высокие значения (близкие к +1), в то время как для открытой воды – отрицательные или низкие значения. Таким образом, выбрав соответствующий порог, можно эффективно отделить лед от воды/свободных ото льда участков. В этом исследовании в качестве метода определения порогового значения использовался метод Оцу. Пиксели с $NDSI \geq 0,42$ были классифицированы как покрытые льдом, а остальные как свободные ото льда.

В данном исследовании использовались снимки со спутников Landsat-8 и Landsat-9, в которых полоса 3 представляет собой зеленую полосу, а полоса 6 – коротковолновый инфракрасный диапазон. Порог для извлечения льда был определен с использованием метода, аналогичного однополосному пороговому подходу. Оптимальный порог, рассчитанный с помощью метода Оцу, был установлен на уровне 0,42. Области со значениями NDSI, превышающими или равными 0,42, были классифицированы как обледенелые, в то время как области со значениями ниже 0,42 были классифицированы как свободные ото льда.

Расчет площади. Каждый пиксель на изображениях дистанционного зондирования представляет определенную площадь поверхности заданного размера. Таким образом, площадь объектов на поверхности может быть рассчитана путем умножения количества

пикселей, относящихся к данному объекту, на площадь одного пикселя. Этот метод широко применяется в дистанционном зондировании благодаря его высокой точности при оценке площади.

С помощью программного обеспечения ArcGIS по значениям пикселей на классификационных изображениях дистанционного зондирования была сгенерирована статистика для получения всех покрытых льдом и свободных ото льда пикселей. На их основе были рассчитаны общие площади покрытых льдом и свободных ото льда участков. Процесс заключается в следующем:

1. Статистика по пикселям.

Для бинарного классификационного изображения, сгенерированного на предыдущем шаге (где ледяным пикселям присваивается значение 1, а неледяным пикселям – значение 0), был выполнен статистический анализ значений пикселей. С использованием функции «Таблица атрибутов растра» в ArcGIS были выделены все пиксели в пределах исследуемой области и общее количество ледяных пикселей N_{ice} и неледяных пикселей $N_{non-ice}$ было рассчитано отдельно.

2. Расчет площади.

На основе пространственного разрешения изображений дистанционного зондирования фактические площади покрытых льдом и свободных ото льда областей были рассчитаны по формулам:

$$A_{ice} = N_{ice} \times (GSD)^2;$$

$$A_{non-ice} = N_{non-ice} \times (GSD)^2,$$

где A_{ice} – общая площадь льда; $A_{non-ice}$ – общая площадь, свободная ото льда; GSD – интервал отбора проб грунта (пространственное разрешение) на изображениях, выраженный в метрах на пиксель.

Пространственное разрешение мультиспектральных полос Landsat-8 и Landsat-9 составляет 30 м. Таким образом, площадь поверхности, представленная одним пикселем, составляет 900 м². Для наглядности и простоты сравнения рассчитанная площадь равномерно переводится в квадратные километры (км²) с использованием коэффициента пересчета: 1 км² = 10⁶ м².

Оценка точности и погрешностей. Все методы классификации с помощью дистанционного зондирования по своей сути связаны с определенными ошибками. Основными источниками ошибок в этом исследовании являются смешанные пиксели и влияние облаков.



Проблема со смешанными пикселями. На границе льда и воды один пиксель размером 30×30 м может содержать как лед, так и воду, что приводит к разнице значений NDSI для чистого льда и чистой воды и потенциально может привести к неправильной классификации.

Влияние облаков и теней. Хотя предпочтение отдавалось изображениям без облаков, тонкие облака и их тени могут изменять спектральную чувствительность поверхности и влиять на значения NDSI.

Для оценки и обеспечения надежности результатов были приняты следующие меры:

1. Визуальная проверка интерпретации. Результаты классификации NDSI были наложены на цветные составные изображения за тот же период. Границы классификации были вручную сопоставлены с визуальными границами льда и воды на изображениях. Для определения причин были зафиксированы и проанализированы явно неправильно классифицированные области.

2. Проверка временной согласованности. Результаты классификации для сходных дат в разные годы сравнивались для проверки логической согласованности их пространственного распределения (например, отступление льда обычно должно происходить от береговой линии к центру озера). Это помогло устранить аномалии, вызванные качеством одного снимка.

3. Проверка общей площади. Общая площадь участков, покрытых льдом и свободных ото льда, рассчитанная в этом исследовании,

сравнивалась с известной общей площадью оз. Кулинда (9,21 км²). Это послужило основой для проверки общей точности процедуры обработки данных.

С помощью систематизированной и тщательно применяемой методологии информация о ледяном покрове оз. Кулинда за 2019–2025 гг. была получена из последовательно снятых снимков Landsat-8 и Landsat-9. Был проведен количественный пространственно-временной анализ, который позволил создать базу данных для последующего изучения характера изменений и ведущих механизмов.

Результаты исследования и их анализ. Рассмотрим пространственно-временные изменения ледяного покрова с 2019 по 2025 г. на основе данных дистанционного зондирования:

1. Пространственно-временные данные о ледяном покрове за 2019 г.

На снимке (рис. 3) видно, что 10 апреля 2019 г. ледяной покров на озере был сплошным и неповрежденным, покрывая самую большую площадь по сравнению со снимками 2019, 2021, 2023 и 2025 гг. Этот набор данных служит важной основой для последующего выявления изменений и количественного анализа. В то же время вдоль южных границ наблюдались ранние признаки таяния.

2. Пространственно-временные данные о ледяном покрове за 2021 г.

По сравнению с картой ледяного покрова 2019 г. (см. рис. 3), данные от 8 апреля 2021 г.

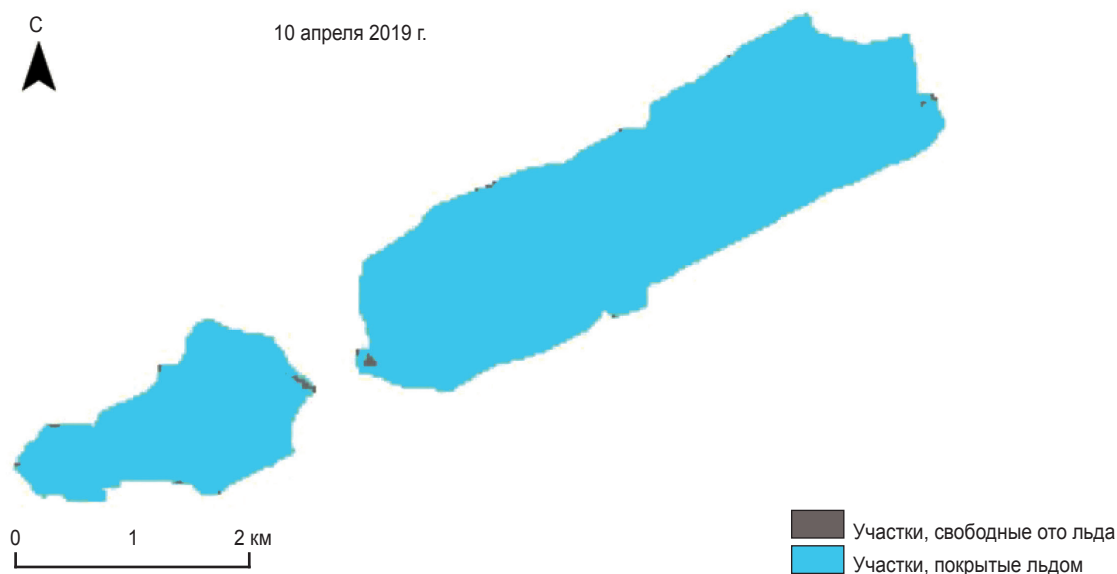


Рис. 3. Пространственно-временные характеристики ледяного покрова в 2019 г.
Fig. 3. Spatiotemporal characteristics of ice cover in 2019



(рис. 4) демонстрируют значительные изменения. На снимках видно, что площадь льда уменьшилась, особенно по краям ледяной массы. Наибольшее сокращение площади льда наблюдалось в восточной и западной частях озера. В этих областях граница между льдом и водой отступила, став более неровной и прерывистой. Эти изменения указывают на четкую тенденцию к уменьшению ледяного покрова в исследуемом районе в течение 2019–2021 гг., что отражает продолжающееся таяние и фрагментацию ледяного покрова.

3. Пространственно-временные данные о ледяном покрове за 2023 г.

Результаты мониторинга изображения от 14 апреля 2023 г. (рис. 5) показывают, что тенденция таяния льда в исследуемом районе продолжается. По сравнению с 2019 и 2021 гг. наиболее заметные изменения произошли в двух аспектах: во-первых, общая площадь ледяного покрова уменьшилась, а граница льда значительно сдвинулась внутрь как в восточной, так и в западной частях озера; во-вторых, в центральной части ледяного покрова появились признаки таяния. Это указывает на то, что деградация ледяного покрова развилась от сокращения прибрежной зоны до внутреннего таяния.

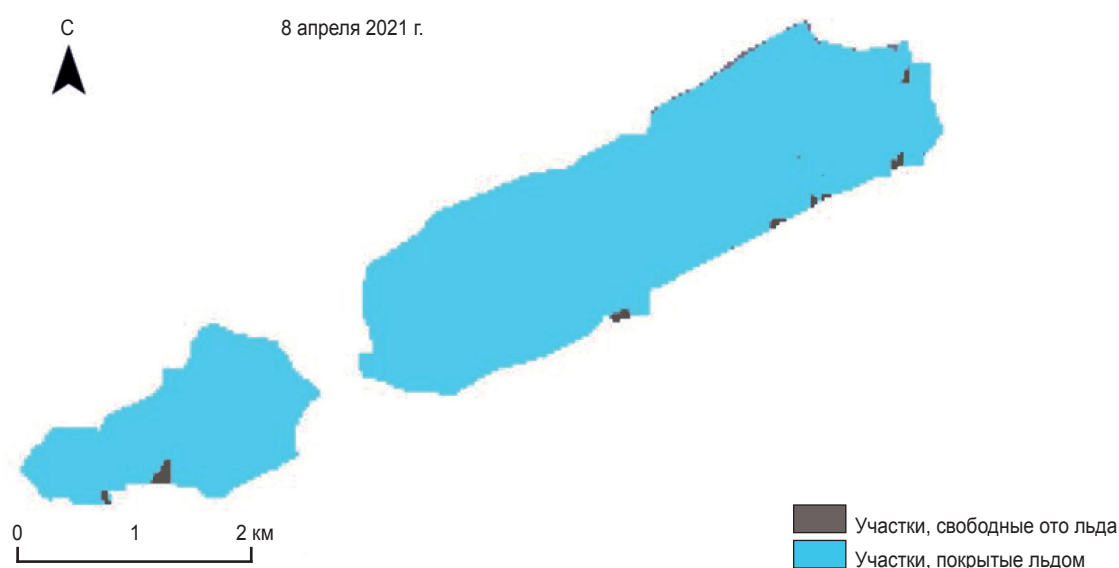


Рис. 4. Пространственно-временные характеристики ледяного покрова в 2021 г.
Fig. 4. Spatiotemporal characteristics of ice cover in 2021

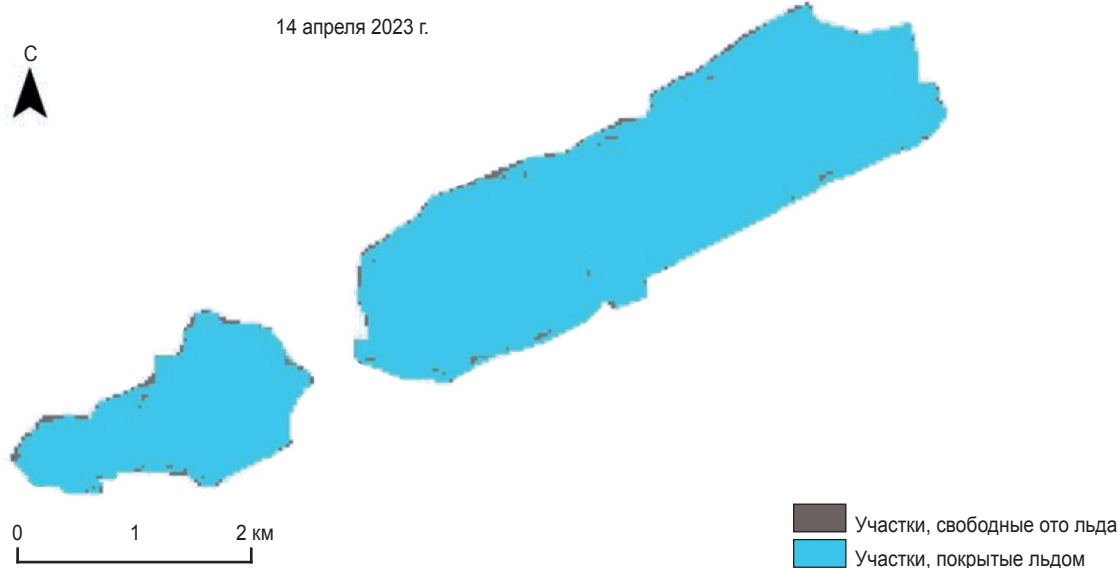


Рис. 5. Пространственно-временные характеристики ледяного покрова в 2023 г.
Fig. 5. Spatiotemporal characteristics of ice cover in 2023



4. Пространственно-временные данные о ледяном покрове за 2025 г.

Результаты анализа снимка от 18 апреля 2025 г. (рис. 6) показывают, что тенденция деградации сохранилась по сравнению с предыдущими снимками. Некогда доминировавшая сплошная ледяная масса еще больше уменьшилась и разделилась на множество более мелких остаточных ледяных масс, что указывает на то, что прежнего преобладающего сплошного ледяного покрова больше нет. В то же время изображение показывает, что за шесть лет пространственно-временной эволюции структура поверхностного покрова исследуемого района претерпела существенные изменения.

Анализ изменений в 2019–2025 годах. В качестве источника данных в этом исследовании были выбраны снимки со спутников Landsat-8 и Landsat-9, полученные в 2019, 2021, 2023 и 2025 гг. Информация о ледяном покрове была получена с использованием метода NDSI, и были составлены бинарные карты покрытых льдом и свободных ото льда областей (см. рис. 3–6).

Результаты выборки показывают непрерывное уменьшение площади льда на оз. Кулинда с 2019 по 2025 г., как подробно описано в таблице. В частности, площадь льда составляла 9,17 км² в 2019 г., 9,09 км² в 2021 г., 8,93 км² в 2023 г., и 8,86 км² в 2025 г. За шестилетний период с 2019 по 2025 г. общее сокращение площади льда составило 0,31 км², что соответствует среднегодовому сокращению на 0,05 км². В период с 2019 по 2021 г. площадь льда сократилась на 0,08 км² (среднегодовое сокращение составляет 0,04 км²). С 2021 по 2023 г. площадь льда сократилась на 0,15 км² (среднегодовое сокращение составило 0,08 км²), что стало самым большим сокращением за все периоды наблюдения. В период с 2023 по 2025 г. площадь льда сократилась на 0,07 км², при этом среднегодовое сокращение составило 0,04 км².

Заключение

На основе снимков со спутников Landsat-8 и Landsat-9, полученных в апреле каждого года с 2019 по 2025 г., в ходе исследования проводился мониторинг и анализ ледовой об-

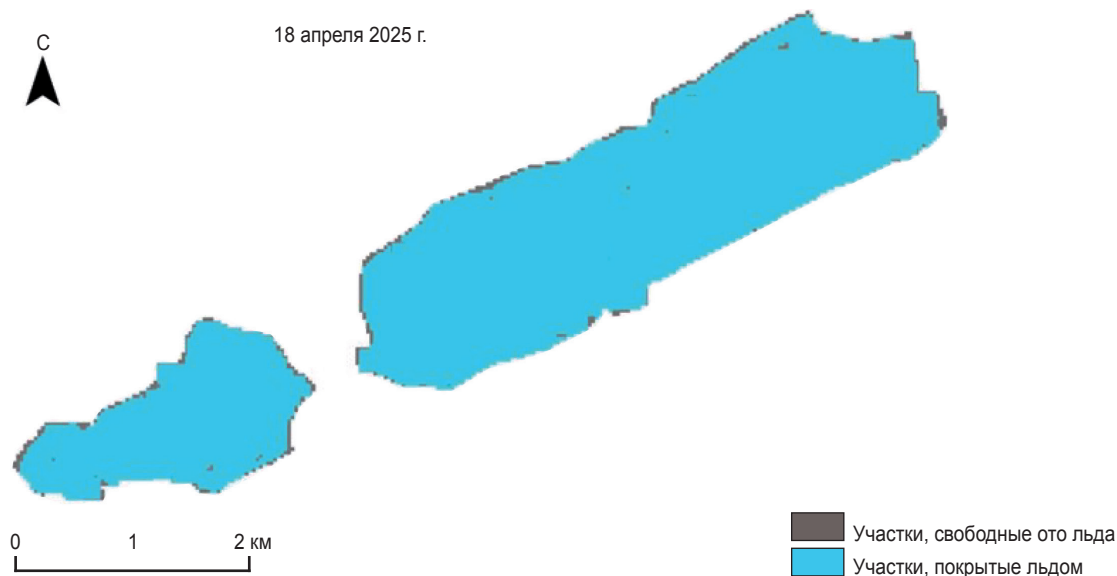


Рис. 6. Пространственно-временные характеристики ледяного покрова в 2025 г.

Fig. 6. Spatiotemporal characteristics of ice cover in 2025

Статистические данные о площади ледового покрова озера Кулинда (2019–2025 гг.) Statistics of lake ice area of Lake Kulinda (2019–2025)

Год	Область, покрытая льдом, км ²	Область, свободная ото льда, км ²	Общая площадь, км ²	Изменения в покрытой льдом области, км ²	Среднее значение, км ²
2019	9,1665	0,0441	9,2106	–	–
2021	9,087	0,1236	9,2106	-0,0795	-0,0398
2023	8,9341	0,2765	9,2106	-0,1529	-0,0765
2025	8,8596	0,351	9,2106	-0,0745	-0,0373



становки на оз. Кулинда с использованием метода NDSI. Основные выводы заключаются в следующем:

1. Площадь льда на оз. Кулинда в течение исследуемого периода демонстрировала устойчивую тенденцию к снижению. Ежегодные темпы таяния льда сначала увеличились, а затем уменьшились. Наименьшее среднегодовое снижение было зафиксировано в 2023–2025 гг. Это указывает на то, что, хотя ледяной покров продолжает сокращаться, темпы сокращения замедлились и больше не характеризуются резкими изменениями.

2. Таяние льда происходило в основном вдоль береговой линии, особенно в юго-восточных и северо-западных прибрежных районах, в то время как центральная часть ледяного покрова оставалась относительно стабильной. Анализ временных рядов показывает, что граница между льдом и водой с каждым годом отступала к центру озера. Что касается изменения площади, то наибольшее сокращение произошло в 2021–2023 гг., когда среднегодовое сокращение составляло 0,08 км². Напротив, среднегодовое сокращение замедлилось

до 0,04 км² в 2023–2025 гг., что указывает на заметное замедление таяния льдов и постепенную стабилизацию процесса таяния.

3. Сравнение с метеорологическими данными выявило четкую корреляцию между уменьшением площади льда и повышением температуры в регионе. Ускоренное таяние в 2021–2023 гг. соответствовало значительному повышению весенних температур в районе. Замедление потери льда после 2023 г. может быть объяснено межгодовой изменчивостью климата и нелинейной реакцией ледовой системы на изменение климата, что отражает фазу адаптации и реорганизации ледовой системы озера в условиях продолжающегося потепления.

Авторы считают, что результаты исследования могут быть использованы при мониторинге фенологического состояния формирования ледяного покрова на озерах Северного Байкала, что будет способствовать лучшему пониманию изменения климата в регионе. Эти результаты могут быть значительно улучшены при использовании более длительной серии спутниковых наблюдений и усовершенствованной синхронизации.

Список источников

1. Frey H., Haeberli W., Linsbauer A., Huggel C., Paul F. A multi-level strategy for anticipating future glacier lake formation and associated hazard potentials // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2010. Vol. 10. Iss. 2. P. 339–352. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-339-2010>.
2. Lützw N., Veh G., Korup O. A global database of historic glacier lake outburst floods // *Earth System Science Data*. 2023. Vol. 15. Iss. 7. P. 2983–3000. <https://doi.org/10.5194/essd-15-2983-2023>.
3. Yan B., Jia H., Ren W., Wu R., Huang X. Glacier lake extraction and variation analysis of the Bujiagangri glacier based on the NDWI-NDSI combination threshold method // *National Remote Sensing Bulletin*. 2022. Vol. 26. Iss. 11. P. 2344–2353. <https://doi.org/10.11834/jrs.20210205>.
4. Luo Z., Liu K., Zhang C., Deng X., Ma R., Song C. Progress of the DEM application for studying lake hydrologic dynamics // *Journal of Geo-Information Science*. 2020. Vol. 22. Iss. 7. P. 1510–1521. <https://doi.org/10.12082/dqxkx.2020.190538>.
5. Zhang C., Yao X., Li S., Liu L., Sha Te., Zhang Yu. Glacier change in the west Kunlun main peak area from 2000 to 2020 // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. Iss. 17. P. 4236. <https://doi.org/10.3390/rs15174236>.
6. Mergili M., Pudasaini S.P., Emmer A., Fischer J.-T., Cochachin A., Frey H. Reconstruction of the 1941 GLOF process chain at Lake Palcacocha (Cordillera Blanca, Peru) // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2020. Vol. 24. Iss. 1. P. 93–114. <https://doi.org/10.5194/hess-24-93-2020>.
7. Wang Q., Wang X., Lei D. The interaction mechanisms between mountain glacier evolution and glacial lake development // *Journal of Glaciology and Geocryology*. 2022. Vol. 44. Iss. 3. P. 1041–1052. <https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0097>.
8. Zhang T., Wang W., Gao T., An B., Shang X. Glacial lake outburst floods on the High Mountain Asia: a review // *Journal of Glaciology and Geocryology*. 2021. Vol. 43. Iss. 6. P. 1673–1692. <https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0066>.
9. Main B., Copland L., Smeda B., Kochtitzky W., Samsonov S., Dudley J., et al. Terminus change of Kaskawulsh Glacier, Yukon, under a warming climate: retreat, thinning, slowdown and modified proglacial lake geometry // *Journal of Glaciology*. 2023. Vol. 69. Iss. 276. P. 936–952. <https://doi.org/10.1017/jog.2022.114>.
10. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Костяной А.Г. Ледовая обстановка в Керченском проливе в текущем столетии. Ретроспективный анализ на основе спутниковых данных // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 2. С. 148–166. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-2-148-166>. EDN: YRFDKF.
11. Higuchi Y., Setoyama D., Isegawa K., Tsuchikawa Y., Matsumoto Y., Parker J.D., et al. Pulsed neutron imaging for differentiation of ice and liquid water towards fuel cell vehicle applications // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2021. Vol. 23. Iss. 2. P. 1062–1071. <https://doi.org/10.1039/d0cp03887c>.



12. Zhao F., Long D., Li X., Huang Q., Han P. Rapid glacier mass loss in the Southeastern Tibetan Plateau since the year 2000 from satellite observations // *Remote Sensing of Environment*. 2022. Vol. 270. P. 112853. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112853>.
13. Qayyum N., Ghuffar S., Ahmad H., Yousaf A., Shahid I. Glacial lakes mapping using multi satellite PlanetScope imagery and deep learning // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020. Vol. 9. Iss. 10. P. 560. <https://doi.org/10.3390/ijgi9100560>.
14. Сухачева Л.Л., Драбкин В.В., Иванов В.В. Результаты мониторинга ледовых условий в Финском заливе, Невской губе и в районе комплекса защитных сооружений в период 2011–2012 гг. // *Метеорологический вестник*. 2013. Т. 5. № 1. С. 31–52. EDN: QBCTUL.
15. Колий В.М., Агафонова С.А. Возможности использования космических снимков для исследования ледяного покрова рек // Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии: сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова (г. Санкт-Петербург, 28–30 марта 2018 г.). СПб.: Научное издание, 2018. С. 48–52. EDN: UVJVWG.
16. Wang Z.Y., Wu Y., Chang J., Zhang X., Peng D. Temporal and spatial variation of lake ice phenology and its influencing factors in the Tibetan Plateau // *Journal of Beijing University of Technology*. 2017. Vol. 43. Iss. 5. P. 701–709. <https://doi.org/10.11936/bjtxb2016090032>.
17. Qi M., Yao X., Li X., Duan H. Spatiotemporal characteristics of Qinghai Lake ice phenology between 2000 and 2016 // *Journal of Geographical Sciences*. 2019. Vol. 29. Iss. 1. P. 115–130. <https://doi.org/10.1007/s11442-019-1590-5>.
18. Wangchuk S., Bolch T. Mapping of glacial lakes using Sentinel-1 and Sentinel-2 data and a random forest classifier: strengths and challenges // *Science of Remote Sensing*. 2020. Vol. 2. P. 100008. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2020.100008>.
19. Hu C., Lee Z., Franz B. Chlorophyll *a* algorithms for oligotrophic oceans: a novel approach based on three-band reflectance difference // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2011. Vol. 117. Iss. C1. P. C01011. <https://doi.org/10.1029/2011JC007395>.
20. Yang C., Wang X., Wei J., Zhang Y., Tang Z., Liu Q., et al. Chinese glacial lake inventory based on 3S technology method // *Acta Geographica Sinica*. 2019. Vol. 74. Iss. 3. P. 544–556. <https://doi.org/10.11821/dlxb201903011>.
21. Boczoń A., Kowalska A., Stolarek A. The impact of climate change on the high water levels of a small river in Central Europe based on 50-year measurements // *Forests*. 2020. Vol. 11. Iss. 12. P. 1269. <https://doi.org/10.3390/f11121269>.
22. Shrestha F., Steiner Ja.F., Shrestha R., Dhungel Ya., Joshi Sh.P., Inglis S., et al. A comprehensive and version-controlled database of glacial lake outburst floods in High Mountain Asia // *Earth System Science Data*. 2023. Vol. 15. Iss. 9. P. 3941–3961. <https://doi.org/10.5194/essd-15-3941-2023>.
23. Luo S., Song C., Zhan P., Fan C., Liu K., Chen T., et al. Satellite laser altimetry reveals a net water mass gain in global lakes with spatial heterogeneity in the early 21st century // *Geophysical Research Letters*. 2022. Vol. 49. Iss. 3. P. e2021GL096676. <https://doi.org/10.1029/2021GL096676>.

References

1. Frey H., Haeberli W., Linsbauer A., Huggel C., Paul F. A multi-level strategy for anticipating future glacier lake formation and associated hazard potentials. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2010;10(2):339-352. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-339-2010>.
2. Lützw N., Veh G., Korup O. A global database of historic glacier lake outburst floods. *Earth System Science Data*. 2023;15(7):2983-3000. <https://doi.org/10.5194/essd-15-2983-2023>.
3. Yan B., Jia H., Ren W., Wu R., Huang X. Glacier lake extraction and variation analysis of the Bujiagangri glacier based on the NDWI-NDSI combination threshold method. *National Remote Sensing Bulletin*. 2022;26(11):2344-2353. <https://doi.org/10.11834/jrs.20210205>.
4. Luo Z., Liu K., Zhang C., Deng X., Ma R., Song C. Progress of the DEM application for studying lake hydrologic dynamics. *Journal of Geo-Information Science*. 2020;22(7):1510-1521. <https://doi.org/10.12082/dqxkx.2020.190538>.
5. Zhang C., Yao X., Li S., Liu L., Sha Te., Zhang Yu. Glacier change in the west Kunlun main peak area from 2000 to 2020. *Remote Sensing*. 2023;15(17):4236. <https://doi.org/10.3390/rs15174236>.
6. Mergili M., Pudasaini S.P., Emmer A., Fischer J.-T., Cochachin A., Frey H. Reconstruction of the 1941 GLOF process chain at Lake Palcacocha (Cordillera Blanca, Peru). *Hydrology and Earth System Sciences*. 2020;24(1):93-114. <https://doi.org/10.5194/hess-24-93-2020>.
7. Wang Q., Wang X., Lei D. The interaction mechanisms between mountain glacier evolution and glacial lake development. *Journal of Glaciology and Geocryology*. 2022;44(3):1041-1052. <https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0097>.
8. Zhang T., Wang W., Gao T., An B., Shang X. Glacial lake outburst floods on the High Mountain Asia: a review. *Journal of Glaciology and Geocryology*. 2021;43(6):1673-1692. (In Chinese). <https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0066>.
9. Main B., Copland L., Smeda B., Kochtitzky W., Samsonov S., Dudley J., et al. Terminus change of Kaskawulsh Glacier, Yukon, under a warming climate: retreat, thinning, slowdown and modified proglacial lake geometry. *Journal of Glaciology*. 2023;69(276):936-952. <https://doi.org/10.1017/jog.2022.114>.
10. Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Kostianoy A.G. Ice conditions in the Kerch strait in the current century. Retrospective analysis based on satellite data. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2017;14(2):148-166. (In Russ.). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-2-148-166>. EDN: YRFDKF.
11. Higuchi Y., Setoyama D., Isegawa K., Tsuchikawa Y., Matsumoto Y., Parker J.D., et al. Pulsed neutron imaging for differentiation of ice and liquid water towards fuel cell vehicle applications. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2021;23(2):1062-1071. <https://doi.org/10.1039/d0cp03887c>.



12. Zhao F., Long D., Li X., Huang Q., Han P. Rapid glacier mass loss in the Southeastern Tibetan Plateau since the year 2000 from satellite observations. *Remote Sensing of Environment*. 2022;270:112853. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112853>.
13. Qayyum N., Ghuffar S., Ahmad H., Yousaf A., Shahid I. Glacial lakes mapping using multi satellite PlanetScope imagery and deep learning. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020;9(10):560. <https://doi.org/10.3390/ijgi9100560>.
14. Suhacheva L.L., Drabkin V.V., Ivanov V.V. Monitoring results of ice conditions in the Gulf of Finland, Neva Bay and in the area of the protective structures complex in the period 2011–2012. *Meteorologicheskii vestnik*. 2013;5(1):31-52. (In Russ.). EDN: QBCTUL.
15. Koliy V.M., Agafonova S.A. The possibilities of using satellite data for the study of the ice cover of rivers. In: *The third Vinogradov readings. Facets of Hydrology: collected reports of the International scientific conference in memory of the outstanding Russian hydrologist Yuri Borisovich Vinogradov*. 28–30 March 2018, St. Petersburg. St. Petersburg: Naukoemkie tekhnologii; 2018, p. 48-52. (In Russ.). EDN: UVJWWG.
16. Wang Z.Y., Wu Y., Chang J., Zhang X., Peng D. Temporal and spatial variation of lake ice phenology and its influencing factors in the Tibetan Plateau. *Journal of Beijing University of Technology*. 2017;43(5):701-709. <https://doi.org/10.11936/bjtxb2016090032>.
17. Qi M., Yao X., Li X., Duan H. Spatiotemporal characteristics of Qinghai Lake ice phenology between 2000 and 2016. *Journal of Geographical Sciences*. 2019;29(1):115-130. <https://doi.org/10.1007/s11442-019-1590-5>.
18. Wangchuk S., Bolch T. Mapping of glacial lakes using Sentinel-1 and Sentinel-2 data and a random forest classifier: strengths and challenges. *Science of Remote Sensing*. 2020;2:100008. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2020.100008>.
19. Hu C., Lee Z., Franz B. Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: a novel approach based on three-band reflectance difference. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2011;117(C1):C01011. <https://doi.org/10.1029/2011JC007395>.
20. Yang C., Wang X., Wei J., Zhang Y., Tang Z., Liu Q., et al. Chinese glacial lake inventory based on 3S technology method. *Acta Geographica Sinica*. 2019;74(3):544-556. <https://doi.org/10.11821/dlxb201903011>.
21. Boczoń A., Kowalska A., Stolarek A. The impact of climate change on the high water levels of a small river in Central Europe based on 50-year measurements. *Forests*. 2020;11(12):1269. <https://doi.org/10.3390/f11121269>.
22. Shrestha F., Steiner Ja.F., Shrestha R., Dhungel Ya., Joshi Sh.P., Inglis S., et al. A comprehensive and version-controlled database of glacial lake outburst floods in High Mountain Asia. *Earth System Science Data*. 2023;15(9):3941-3961. <https://doi.org/10.5194/essd-15-3941-2023>.
23. Luo S., Song C., Zhan P., Fan C., Liu K., Chen T., et al. Satellite laser altimetry reveals a net water mass gain in global lakes with spatial heterogeneity in the early 21st century. *Geophysical Research Letters*. 2022;49(3):e2021GL096676. <https://doi.org/10.1029/2021GL096676>.

Информация об авторах / Information about the authors



Гу Мэнъяо,

студент, магистр инженерной геодезии,
Школа геодезии и инженерии земельной информации,
Хэнаньский политехнический университет,
г. Цзяоцзо, Китай,
✉ gumengyao77@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0007-4171-8608>

Mengyao Gu,

Student, Master of Surveying and Mapping Engineering,
School of Surveying and Land Information Engineering,
Henan Polytechnic University,
Jiaozuo, China,
✉ gumengyao77@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0007-4171-8608>



Мэн Сяньюй,

студент, магистр инженерной геодезии,
Школа геодезии и инженерии земельной информации,
Хэнаньский политехнический университет,
г. Цзяоцзо, Китай,
Mengxiangyu2001@outlook.com
<https://orcid.org/0009-0006-8770-1679>

Xiangyu Meng,

Student, Master of Surveying and Mapping Engineering,
School of Surveying and Land Information Engineering,
Henan Polytechnic University,
Jiaozuo, China,
Mengxiangyu2001@outlook.com
<https://orcid.org/0009-0006-8770-1679>



Жуликов Владимир Михайлович,
студент,
Байкальский институт БРИКС,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация,
wowaahhh@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0000-3637-9567>
Vladimir M. Zhulikov,
Student,
Baikal School of BRICS,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation,
wowaahhh@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0000-3637-9567>



Рупосов Виталий Леонидович,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
доцент кафедры маркшейдерского дела и геодезии,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация,
ruposov@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-2202-9034>
Vitaliy L. Ruposov,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Mine Surveying and Geodesy,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation,
ruposov@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-2202-9034>

Вклад авторов / Contribution of the authors

М. Гу – проведение исследования, разработка методологии, формальный анализ, валидация результатов, визуализация, написание черновика рукописи.

С. Мэн – проведение исследования, разработка методологии, формальный анализ, валидация результатов, визуализация, написание черновика рукописи.

В.М. Жуликов – курирование данных, редактирование рукописи.

В.Л. Рупосов – разработка концепции, административное руководство исследовательским проектом, предоставление ресурсов.

Mengyao Gu – investigation, methodology, formal analysis, validation, visualization, writing – original draft.

Xiangyu Meng – investigation, methodology, formal analysis, validation, visualization, writing – original draft.

Vladimir M. Zhulikov – data curation, writing – editing.

Vitaliy L. Ruposov – conceptualization, project administration, resources.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 22.04.2026; одобрена после рецензирования 07.05.2026; принята к публикации 18.05.2026.

The article was submitted 22.04.2026; approved after reviewing 07.05.2026; accepted for publication 18.05.2026.