

Научная статья

УДК 556.55(571.511)

DOI: 10.17072/2079-7877-2026-3-106-115

EDN: GTSUSL

**ДИНАМИКА УРОВНЯ И ПЛОЩАДИ ЗЕРКАЛА ОЗЕРА ПЯСИНО (КРАСНОЯРСКИЙ КРАЙ)
В 2013–2024 гг. ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ****Александр Владимирович Дьяченко** ✉, **Дмитрий Михайлович Безматерных**

Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, г. Барнаул, Россия

✉ dychenko@iwep.ru, ORCID: 0000-0003-4178-8415, AuthorID РИНЦ: 661734

Аннотация. Пясино – озеро ледникового происхождения в России на юго-западе Северо-Сибирской низменности (территория Красноярского края), расположенное примерно в 20 км от Норильска. По данным космического зондирования Landsat-8 (Landsat-9) и Sentinel-2 (81 снимок за период 2013–2024 гг.) выявлена статистически значимая линейная зависимость уровня и площади зеркала этого озера. Показаны общие тенденции гидрологического режима озера в сезонном аспекте за данный период времени. Сезонная динамика уровня воды и, соответственно, площади зеркала озера совпадает с гидрологическим режимом р. Норильской, пик половодья которой приходится на июль. За указанный период исследования максимальная площадь зеркала изменялась от 462 км² в 2013 г. до 873 км² в 2014 г., минимальная – от 307 км² в 2013 г. до 619 км² в 2023 г. Наименьшая площадь зеркала (за период открытой воды) в 307 км² зафиксирована 27.08.2013 г. при уровне 24,9 м, наибольшая – 873 км² 13.07.2014 г. при уровне 30,7 м. В целом, пониженная площадь зеркала отмечается в 2013, 2016, 2020, 2022 гг. Повышенная площадь зеркала характерна для 2014, 2019, 2023 гг. Минимальный уровень оз. Пясино в 24,9 м зафиксирован 27.08.2013 г., максимальный в 30,7 м – 13.07.2014 г. Таким образом, максимальная амплитуда уровня за исследуемый период, согласно нашим результатам анализа космоснимков, составила 5,8 м. Максимальная годовая амплитуда в 2020 г. – 3,8 м. Средний уровень воды озера – 28,6 м.

Ключевые слова: Таймыр, Норильск, гидрология, площадь, морфометрия, ДЗЗ

Финансирование. Статья подготовлена за счет средств федерального бюджета на выполнение государственного задания Института водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук.

Для цитирования: Дьяченко А. В., Безматерных Д. М. Динамика уровня и площади зеркала озера Пясино (Красноярский край) в 2013–2024 гг. по данным космического зондирования // Географический вестник = Geographical bulletin. 2026. № 3(78). С. 106–115. EDN: GTSUSL DOI: 10.17072/2079-7877-2026-3-106-115

Original article

DOI: 10.17072/2079-7877-2026-3-106-115

EDN: GTSUSL

**WATER LEVEL AND SURFACE AREA DYNAMICS OF LAKE PYASINO (KRASNOYARSK KRAI)
IN 2013–2024 FROM SATELLITE REMOTE SENSING DATA****Alexander V. Dyachenko** ✉, **Dmitry M. Bezmaternykh**

Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia

✉ dychenko@iwep.ru, ORCID: 0000-0003-4178-8415, eLibrary AuthorID: 661734

Abstract. Pyasino is a lake of glacial origin located in the southwest of the North Siberian Lowland (Krasnoyarsk Krai, Russia), approximately 20 km from Norilsk. The measurements based on the Landsat-8 (Landsat-9) and Sentinel-2 remote sensing data (81 images for 2013–2024) suggest a statistically significant linear dependence of the water level and surface area of Lake Pyasino. The paper presents the general trends of the lake's hydrological regime in seasonal aspects for the given period. Seasonal dynamics of the water level and, accordingly, the lake area coincide with the hydrological regime of the Norilskaya River, having its flood peak in July. The maximum area during the study period varied from 462 km² in 2013 to 873 km² in 2014, and its minimum – from 307 to 619 km² in 2013 and 2023, respectively. The smallest lake area of 307 km² was recorded during the open water period on 27 August 2013 at a 24.9 m level, while the largest (873 km²) – on 13 July 2014 at a 30.7 m level. In general, the lake area reduced in 2013, 2016, 2020, and 2022; its increase was noted in 2014, 2019, and 2023. The minimum water level (24.9 m) of Lake Pyasino was recorded on 27 August 2013,



Гидрология

Дьяченко А. В., Безматерных Д. М.

whereas the maximum (30.7 m) – on 13 July 2014. According to our measurements, the greatest long-term water level amplitude was 5.8 m, the lowest annual amplitude – 3.8 m (2020), and the average lake level – 28.6 m.

Keywords: Taymyr, Norilsk, hydrology, area, morphometry, remote sensing

Funding. The study was funded from the federal budget as part of the state assignment undertaken by the Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Dyachenko A. V., Bezmaternykh D. M. Water level and surface area dynamics of lake Pyasino (Krasnoyarsk Krai) in 2013–2024 from satellite remote sensing data. *Geographical Bulletin*, 2026, no. 3(78), pp. 106–115. EDN: GTSUS DOI: 10.17072/2079-7877-2026-3-106-115

Введение

Норило-Пясинская водная система (НПВС) является уникальным аazonальным водным комплексом арктической зоны России, который представляет собой сеть озер, соединенных водотоками (рис. 1). Эта озерно-речная система находится в зоне лесотундры на севере Красноярского края (п-ов Таймыр) [18].

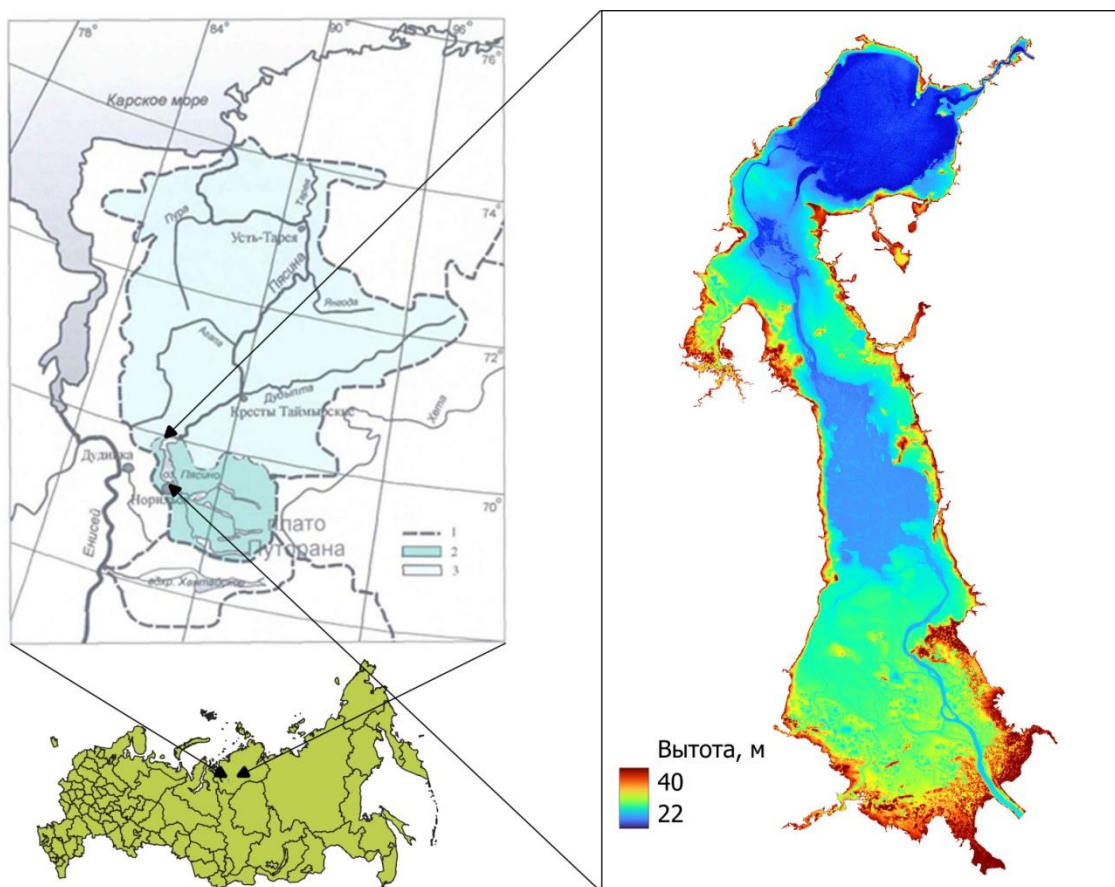


Рис. 1. Водосборный бассейн р. Пясины и ЦМР Copernicus котловины оз. Пясино:

- 1 – границы водосборов; 2 – верхний участок водосбора р. Пясины (Норило-Пясинская озерно-речная система);
3 – транзитный и устьевой участки водосбора р. Пясины [21]

Fig. 1. The Pyasina River catchment basin and Copernicus DEM of Lake Pyasino depression:

- 1 – catchment boundaries; 2 – upper section of the Pyasina River catchment (Norilskaya-Pyasina lake-river system);
3 – transit and estuary sections of the Pyasina River catchment [21]

Пясино – озеро ледникового происхождения, расположенное примерно в 20 км от Норильска. Замерзает оно в начале октября, вскрывается ото льда в конце июня – начале июля. По данным исследований [6; 11], озеро имеет площадь около 735 км², максимальную глубину 39,1 м и среднюю глубину 4 м, является проточным и мелководным. Среднегодовое значение высоты уровня воды над уровнем моря составляет 28 м. Из озера вытекает река Пясины, которая впадает в Пясинский залив Карского моря. Основной приток озера – река Норильская (Норилка), которую можно считать верхним течением р. Пясины. Река Норильская при впадении в озеро образует речную дельту, частью которой является также р. Амбарная. Другие притоки озера незначительны и слабоизучены. Площадь водосбора – 24000 км². Берега Пясино в основном пологие, местами заболоченные. Озеро собирает воды крупных озер (Лама, Кета, Глубокое), находящихся в горах Путорана [5]. Согласно принятой в России классификации [7], оз. Пясино по площади и объему относится к большим водоемам.

Специфика гидрологической изученности НПВС заключается во фрагментарности наблюдений, направленных в основном на решение прикладных задач освоения и развития промышленного района. Первые экспедиции (1919–1937 гг.) проводились с целью определения судоходности р. Пясины и оз. Пясино, а также рыбохозяйственного значения озер НПВС [6; 22]. Начало режимных гидрологических наблюдений на водных объектах НПВС относится к 1936–1937 гг., когда были организованы посты на р. Норилке (пос. Валёк) и на малых реках бассейна озера в связи со строительством Норильского комбината [19]. Впоследствии наблюдения проводились на 60 речных и 17 озерных постах, среди которых преобладали двухгодичные наблюдения для целей инженерно-гидрологических изысканий. Исключения составили посты на озере Лама, реках Норилке, Амбарной, Талнах, где имеются продолжительные ряды наблюдений. Озерный гидрологический пост на озере (северо-восточный берег), по нашим данным, функционировал в периоды 1943–1945, 1980–1983, 1985–1991 гг. и не имел привязку к Балтийской высотной системе координат.

Наибольшее антропогенное воздействие НПВС испытывает от предприятий Норильского горнометаллургического комплекса и населенных пунктов Норильского района [4; 17]. Выполненная работа связана с изучением последствий катастрофического разлива дизельного топлива в районе г. Норильска 29 мая 2020 г. из одного из резервуаров на территории ТЭЦ-3 [3]. При этом часть топлива попала в оз. Пясино. В 2022 году для уточнения цифровой модели рельефа котловины и оценки потенциала самоочищения озера в рамках Большой норильской экспедиции Сибирского отделения РАН были выполнены комплексные лимнологические исследования [1]. Целью данной работы является изучение сезонной динамики площади зеркала и уровня воды озера за последние годы по данным космического зондирования.

Материалы и методы

Для определения площади зеркала в различные фазы гидрологического цикла при тех или иных уровнях воды использовались следующие данные дистанционного зондирования Земли: Landsat-5, Landsat-8 (Landsat-9), Sentinel-2 (Sentinel-2A, Sentinel-2B), Copernicus Global Digital Elevation Models.

Landsat-5 – пятый спутник дистанционного зондирования Земли в рамках программы Landsat (США). Landsat-5 выведен на орбиту 1 марта 1984 г. и оборудован двумя сенсорами – MSS (Multi-Spectral Scanner) и TM (Thematic Mapper). В данной работе использовались только данные сенсора TM [27].

Landsat-8 и Landsat-9 – восьмой и девятый спутники дистанционного зондирования Земли в рамках программы Landsat (США). Landsat-8 выведен на орбиту 11.02.2013 г., Landsat-9 – 27.09.2021 г. Спутник Landsat-8 оборудован двумя сенсорами: OLI (Operational Land Imager) и TIRS (Thermal InfraRed Sensor). Landsat-9 оборудован более совершенными версиями данных сенсоров – OLI-2 и TIRS-2 [27].

Sentinel-2 – семейство спутников дистанционного зондирования Земли Европейского космического агентства, созданное в рамках проекта безопасности и глобального мониторинга окружающей среды. В настоящее время представлено двумя спутниками – Sentinel-2A и Sentinel-2B. Запуск спутника Sentinel-2A состоялся 23.06.2015 г., спутника Sentinel-2B – 07.03.2017 г. На спутниках Sentinel-2 установлена единая мультиспектральная камера (multi-spectral instrument, MSI), которая позволяет осуществлять съемку в 13 спектральных каналах, предоставляя на выходе снимки различного пространственного расширения – 4 канала в 10-метровом разрешении, 6 каналов в 20-метровом разрешении, 3 канала в 60-метровом разрешении [25].

Цифровая модель рельефа (ЦМР) Copernicus представляет поверхность Земли, включая здания, инфраструктуру и растительность. Она является производной от отредактированной ЦМР WorldDEM, где было проведено сглаживание водоемов, согласование дренажной системы рек (гидрологически корректная ЦМР), редактирование береговых линий и неправдоподобных структур местности. ЦМР WorldDEM основана на радарных спутниковых данных, полученных во время миссии TanDEM-X, которая финансируется German Aerospace Centre и Airbus Defence and Space, являющимся подразделением Airbus Group. Пространственное разрешение ЦМР Copernicus (размер пикселя информации) на широте оз. Пясино составляет около 20 м. На район озера Пясино ЦМР Copernicus содержит информацию о надводных высотах местности по состоянию уровня воды на 27.08.2013 г. Средний уровень воды озера Пясино на данную дату составил 24,9 м БС. Ниже уровня воды озера Пясино и его притоков по состоянию на 27.08.2013 г. информация о высотах местности в ЦМР Copernicus отсутствует [26]. Фрагмент ЦМР Copernicus на котловину оз. Пясино представлен на рис. 1.

В целях измерения площади зеркала оз. Пясино был выбран 81 космоснимок Landsat-8 (Landsat-9) и Sentinel-2 за период 2013–2024 гг. с отсутствием или минимальным количеством облаков над водной поверхностью.

Для выделения водной поверхности на космоснимках использовалась модификация нормализованного разностного водного индекса MNDWI [16; 23; 24; 28]. Для расчета MNDWI берутся каналы видимого зеленого (G) и коротковолнового инфракрасного спектра (SWIR) (формула 1):

$$MNDWI = \frac{G - SWIR}{G + SWIR} \quad (1)$$

Гидрология

Дьяченко А. В., Безматерных Д. М.

Для космоснимков Landsat-5 формула расчета MNDWI (формула 2):

$$MNDWI_{Landsat-5} = \frac{Band2 - Band5}{Band2 + Band5} \quad (2)$$

Для космоснимков Landsat-8 (Landsat-9) формула расчета MNDWI приобретает вид (формула 3):

$$MNDWI_{Landsat-8} = \frac{Band3 - Band6}{Band3 + Band6} \quad (3)$$

Для космоснимков Sentinel-2 индекс MNDWI рассчитывается как (формула 4):

$$MNDWI_{Sentinel-2} = \frac{Band3 - Band11}{Band3 + Band11} \quad (4)$$

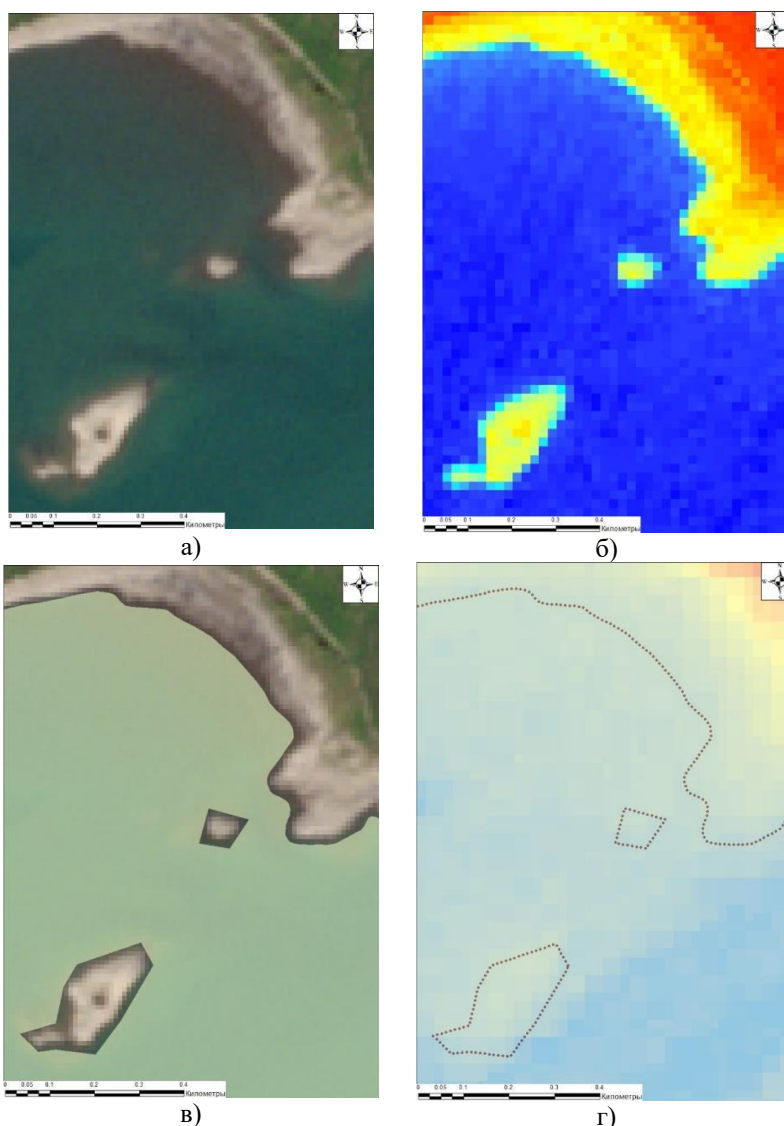


Рис. 2. Процесс обработки линии уреза воды для расчета площади зеркала и высоты воды оз. Пясино:

а) фрагмент участка оз. Пясино на космоснимке Sentinel-2 от 19.08.2020 г.;

б) результат расчета индекса MNDWI;

в) выделение линии уреза и расчет ограниченной ею площади зеркала озера; г) генерация набора точек на урезе воды и присвоение каждой точке значения высоты с соответствующего пикселя ЦМР Copernicus.

Fig. 2. Processing of the water edge line for calculating the area and water level of Lake Pyasino:

а) a fragment of a section of Lake Pyasino in a Sentinel-2 satellite image from August 19, 2020;

б) the result of calculating the MNDWI index; в) identifying the water edge line and calculating the lake area;

г) generating a set of points on the water edge and assigning each point an elevation value from the corresponding pixel of the Copernicus DEM

На результаты расчета индекса MNDWI может влиять обширный ряд факторов: параметры водного объекта (площадь зеркала, прозрачность воды, извилистость береговой линии и др.), характеристики измерительной аппаратуры (пространственное разрешение, спектральные диапазоны, углы съемки), условия съемки (освещенность, состояние атмосферы) [10; 12; 14], поэтому пороговое значение данного индекса для выделения водной поверхности для каждого космоснимка подбиралось индивидуально с последующей ручной коррекцией линии уреза воды исходя из визуального анализа цветного композита RGB данного снимка. Воды притоков озера Пясино (р. Норильская, р. Амбарная и др.) также отделялись от зеркала озера вручную в процессе визуального анализа цветного композита RGB конкретного снимка.

После выделения линии уреза воды и расчета площади полигона, ограниченного данной линией (площадь зеркала воды), на ней с промежутком 10 м генерировался набор точек, лежащих на всей протяженности уреза воды оз. Пясино для данного космоснимка. Каждой сгенерированной точке присваивалось значение высоты из соответствующего значения пиксела цифровой модели рельефа Copernicus данного местоположения. Среднее арифметическое значение всех высот точек принималось равным среднему уровню поверхности воды озера на данном космоснимке на соответствующую дату съемки. Все указанные операции с пространственными данными выполнялись в среде ArcGis 10.2 и проиллюстрированы на рис. 2.

Результаты и их обсуждение

Измерения уровней и площадей водной поверхности оз. Пясино по данным космического зондирования не дают полноценные ряды наблюдений этих характеристик, но позволяют выявить общую тенденцию гидрологического режима озера в сезонном и многолетнем аспектах. Основным лимитирующим фактором подобных измерений является наличие космоснимков, свободных от облаков над акваторией озера.

Результаты измерений площадей зеркала и уровней озера по данным космического зондирования Landsat-8 (Landsat-9) и Sentinel-2 за период 2013–2024 гг. представлены на рис. 3. Для сравнения на рисунок также добавлены результаты непосредственных измерений площадей зеркала озера по ЦМР Copernicus методом горизонтальных сечений цифровой модели рельефа для соответствующего диапазона высот с интервалом 0,1 м. Расхождение кривых связи, построенных этими разными методами, при низких уровнях обусловлено продольным уклоном озера, особенно проявляющимся в меженный период, когда озеро разбивается на ряд небольших водоемов, соединенных узкими протоками. При высоких уровнях метод расчета площадей зеркала горизонтальными сечениями по ЦМР Copernicus к площади зеркала озера суммирует также площади, относящиеся по факту при данном уровне к руслу р. Норилки, что необоснованно завышает площадь зеркала озера. Устье реки Норилки, в зависимости от уровня воды оз. Пясино, смещается вдоль русла более чем на 20 км. Близкая к линейной форма связи уровня и площади озера в исследуемом диапазоне высот объясняется обширными равномерно повышающимися мелководьями в средней и особенно в южной части оз. Пясино, за счет которых и происходит главным образом приращение площади озера при увеличении уровня.

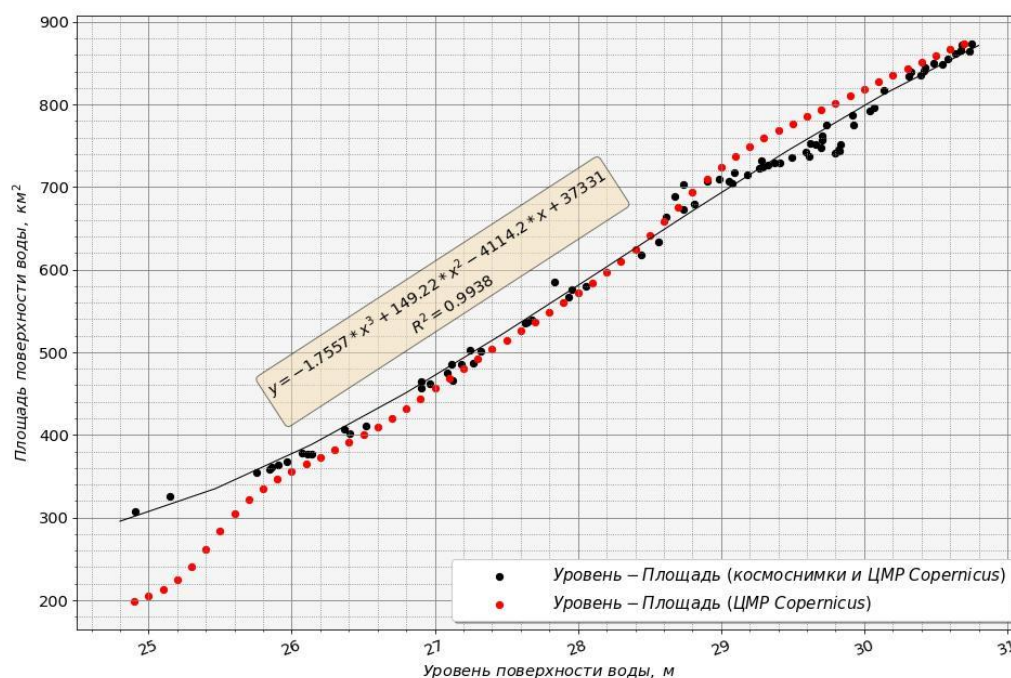


Рис. 3. Результаты измерений площадей зеркала и уровней воды озера Пясино по данным космического зондирования Landsat-8 (Landsat-9) и Sentinel-2 за период 2013–2024 гг.

Fig. 3. Measurement data on the areas and water levels of Lake Pyasino from Landsat-8 (Landsat-9) and Sentinel-2 for the period 2013–2024

Уровенный режим озера Пясино существенно зависит от гидрологического режима р. Норилки [19], который подвержен многолетним циклическим колебаниям, вероятно, связанным с изменением солнечной активности [2]. В 1943–1945 годы весенний подъем уровня отмечался в мае и достигал своего максимума к концу июля. Плавный спад уровня продолжается до марта-апреля, при этом дождевые паводки дают лишь незначительные его подъемы. Годовая амплитуда колебаний уровня составляла, по данным этих измерений, около 5 м, а многолетняя превышала 6,5 м [6]. По нашей информации, озерный гидрологический пост не был привязан к Балтийской системе высот, поэтому данные наблюдений на нем имеют только относительный характер. Столь высокие подъемы уровня воды объясняются большой ролью озер Лама и Глубокого, сбрасывающих в котловину оз. Мелкого часть запасов своих вод, которые затем поступают в оз. Пясино [19].

Данные наших измерений уровня воды с использованием ЦМР Copernicus и космоснимков в целом соответствуют этой тенденции, но в силу своей фрагментарности не позволяют выявить четкую динамическую картину уровня озера. Минимальный уровень озера Пясино в 24,9 м зафиксирован 27.08.2013 г., максимальный в 30,7 м – 13.07.2014 г. Таким образом, максимальная многолетняя амплитуда уровня по нашим измерениям составила 5,8 м. Максимальная годовая амплитуда в 2020 г. составила 3,8 м. Средний уровень озера по 81 космоснимку определен как 28,6 м.

В данной работе находился средний уровень воды без учета уклонов, вызванных стонно-нагонными явлениями, а также продольных гидродинамических уклонов озера, наиболее ярко проявляющихся в меженьный период. Среднее стандартное отклонение по всем проведенным измерениям уровня воды составило 0,68 м, стандартная ошибка среднего – 0,01 м для доверительного интервала 95 %, что в целом характеризует ошибку измерений данного метода. В отсутствии данных непосредственных наблюдений за уровнем режимом оз. Пясино с привязкой к Балтийской высотной системе отсчета данный метод видится обоснованным. Невязка высотной системы ЦМР Copernicus к Балтийской высотной системе отсчета требует проведения дополнительных натурных исследований, но можно предположить, что невязка между этими высотными системами для района озера ниже точности измерений высот уровня воды по ЦМР Copernicus проведенных в данной работе. По результатам выполненных измерений предлагается кубическая зависимость уровень – площадь озера, представленная на рис. 3.

Обобщение по годам непосредственно измеренной площади оз. Пясино по 81 космоснимку в сезонном аспекте представлено в табл. 1. За указанный период исследования (рис. 4) максимальная площадь изменялась от 462 км² в 2013 г. до 873 км² в 2014 г., минимальная – от 307 км² в 2013 г. до 619 км² в 2023 г. Наименьшая площадь зеркала озера (за период открытой воды) в 307 км² зафиксирована 27.08.2013 г. при уровне 24,9 м, наибольшая – 873 км² 13.07.2014 г. при уровне 30,7 м. В целом, пониженная площадь зеркала озера отмечается в 2013, 2016, 2020, 2022 гг. Повышенная площадь зеркала характерна для 2014, 2019, 2023 гг. Водная поверхность озера при наименьшем и наибольшем уровне за период исследования представлена на рис. 5. Среднее значение максимальных площадей зеркала озера за исследуемые 12 лет составило 756,2 км², а минимальных – 445,7 км². Амплитуда колебаний площади зеркала в различные годы колебалась от 155 км² в 2013 г. до 378 км² в 2020 г., в среднем – 295,4 км².

Таблица 1

Table 1

Данные измерений площади зеркала оз. Пясино
по данным космического зондирования Landsat-8 (Landsat-9) и Sentinel-2
за период 2013–2024 гг. (за период открытой воды)
Data on Lake Pyasino area measurements from Landsat-8 (Landsat-9) and Sentinel-2
for the open water period in 2013–2024

Год	Максимальная площадь зеркала, км ²	Минимальная площадь зеркала, км ²	Амплитуда, км ²
2013	462	307	155
2014	873	нет данных	–
2015	714	нет данных	–
2016	709	361	348
2017	748	474	274
2018	757	457	300
2019	872	567	305
2020	737	359	378
2021	817	нет данных	–
2022	724	401	323
2023	865	619	246
2024	796	466	330
Среднее±SE	756,2±32,1	445,7±33,7	295,4±21,8

Примечание: SE – стандартная ошибка

Note: SE is a standard error

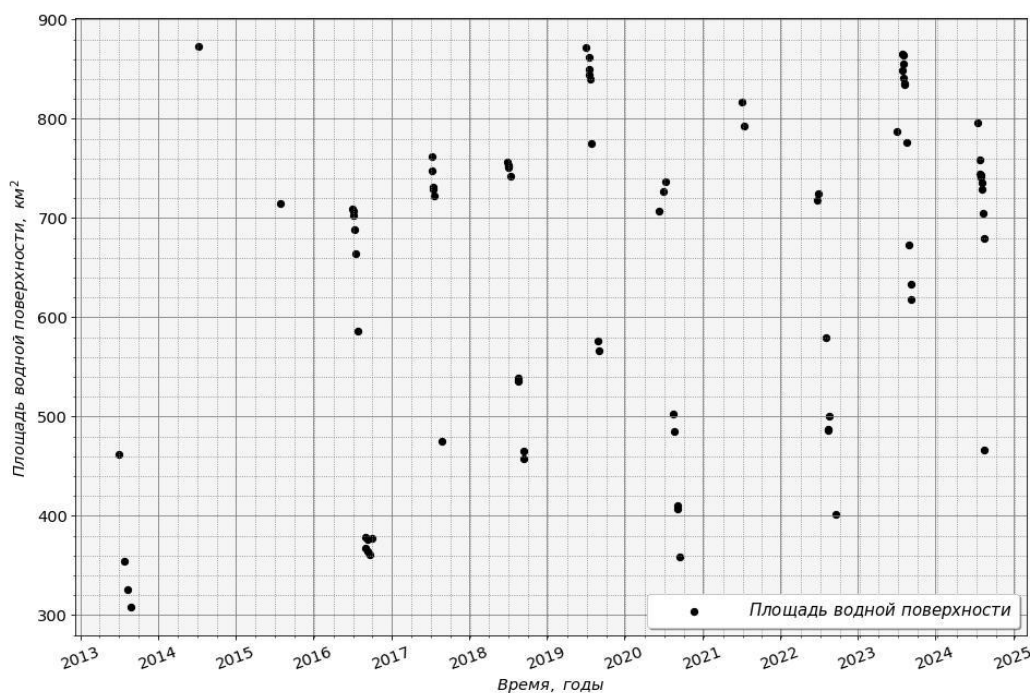


Рис. 4. Динамика площади водной поверхности оз. Пясино по результатам анализа данных космического зондирования Landsat-8 (Landsat-9) и Sentinel-2 за период 2013–2024 гг.

Fig. 4. Dynamics of the water area of Lake Pyasino based on the analysis of Landsat-8 (Landsat-9) and Sentinel-2 remote sensing data for 2013–2024

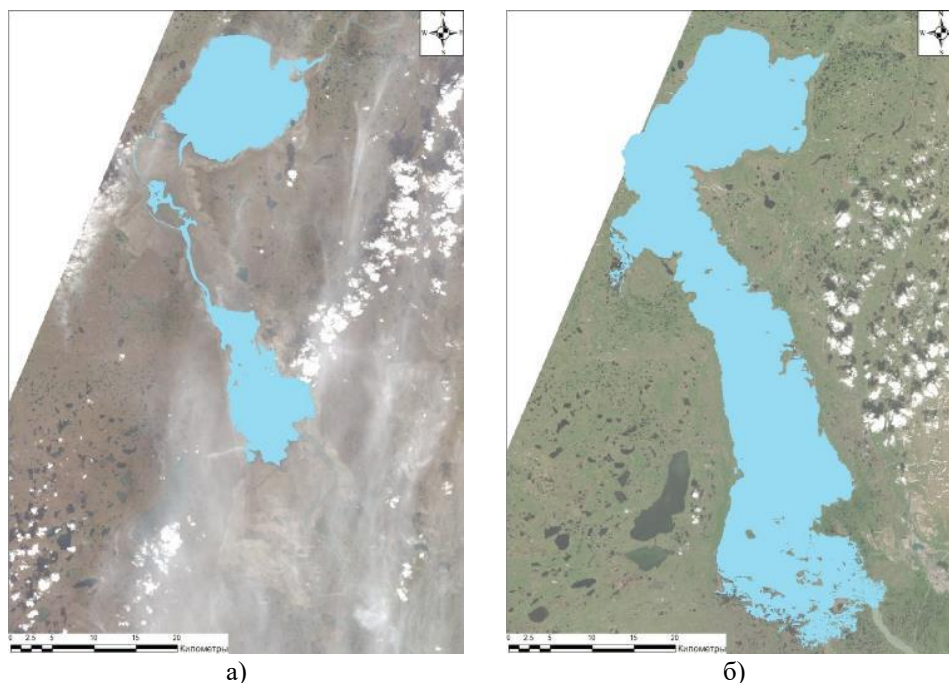


Рис. 5. Водная поверхность оз. Пясино

а) при наименьшем (27.08.2013), б) наибольшем (13.07.2014) уровне по данным анализа спутниковых снимков Landsat-8 (Landsat-9) и Sentinel-2 за период 2013–2024 гг.

Fig. 5. Water surface of Lake Pyasino at its а) lowest (27 August 2013) and б) highest (13 July 2014) levels according to the analysis of Landsat-8 (Landsat-9) and Sentinel-2 satellite images for 2013–2024

Сезонная динамика уровня воды и, соответственно, площади зеркала совпадает с гидрологическим режимом р. Норильской, пик половодья которой приходится на июль [2] (табл. 2). В озере Таймыр (1945–1980 гг.) максимальный уровень воды также наблюдается в июле [15]. Такой же гидрологический режим характерен и для других крупных озер этого региона: Мелкое и Хантайское [19].

Гидрология

Дьяченко А. В., Безматерных Д. М.

В большинстве ранее опубликованных гидрологических справочниках [8; 9; 19; 20] для оз. Пясино указывается площадь водной поверхности в 735 км². Однако в «Краткой географической энциклопедии» [13] указано, что площадь зеркала составляет 850–900 км². Эти данные вполне соответствуют нашим результатам о максимальной площади зеркала.

Таблица 2

Table 2

Среднемесячные (за периоды открытой воды) значения расходов воды р. Норильская за многолетний период 1938–2005 гг. и в 2013, 2014 гг.

Monthly averages (for open water periods) of the Norilskaya River water discharge for the multi-year period 1938–2005 and in 2013, 2014

Период наблюдений	Средние расходы воды, м ³ /с				
	VI	VII	VIII	IX	X
1938–2005 [21]	1030	1650	952	632	420
2013	663	446	262	312	161
2014	1508	2422	1566	1238	449

Выводы

Проведенные исследования позволили уточнить гидрологические характеристики оз. Пясино. По результатам измерений, исходя из данных космического зондирования Landsat-8 (Landsat-9) и Sentinel-2 за период 2013–2024 гг., выявлена зависимость уровня и площади зеркала оз. Пясино. Показаны общие тенденции гидрологического режима озера в сезонном аспекте за данный период времени. Наименьшая площадь зеркала (за период открытой воды) – 307 км² – зафиксирована 27.08.2013 г. при уровне 24,9 м, наибольшая – 873 км² – 13.07.2014 г. при уровне 30,7 м в высотной системе ЦМР Copernicus. При этом сезонная амплитуда изменения площади зеркала достигает 378 км².

Библиографический список

1. Безматерных Д. М. Оценка потенциала самоочищения озера Пясино (Красноярский край) // География и природопользование Сибири. 2024. № 2. С. 88–94.
2. Безматерных Д. М., Губарев М. С., Дьяченко А. В., Свиридов Р. К., Вагнер А. А. Гидрологический режим рек Норило-Пясинской озёрно-речной системы (Красноярский край) в 2021 году // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: Мат. IV Всерос. науч. конф. с междунар. участ. (Барнаул, 29 августа–3 сентября 2022 г.). Барнаул, 2022. Т. 1. С. 70–74. EDN: KLGDOY
3. Безматерных Д. М., Пузанов А. В., Котовицков А. В., Дроботов А. В., Толмеев А. П. Гидрохимические показатели качества воды Норило-Пясинской озёрно-речной системы после разлива дизельного топлива на ТЭЦ-3 г. Норильска в 2020 г. // Сибирский экологический журнал. 2021. № 4. С. 408–422. DOI: 10.15372/SEJ20210402 EDN: QPRANH
4. Брызгалов В. А., Иванов В. В., Замятин В. Ю., Макеев В. М. Чрезвычайные экологические ситуации в районах Российского Севера. СПб: Изд-во ГПА, 2004. 82 с. EDN: YAIIHZ
5. Вода России: научно-популярная энциклопедия. URL: <https://water-rf.ru> (дата обращения: 25.10.2020)
6. География озёр Таймыра / отв. ред. В. Н. Адаменко, А. Н. Егоров. Л.: Наука, 1985. 224 с.
7. ГОСТ Р 59054-2020. Охрана окружающей среды. Поверхностные и подземные воды. Классификация водных объектов. 24 с.
8. Доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2020 году». М.: Росводресурсы, НИИ-Природа, 2022. 510 с.
9. Доманицкий А. П., Дубровина Р. Г., Исаева А. И. Реки и озера Советского Союза. Справочные данные. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1971. 104 с.
10. Донцов А. А., Суторихин И. А. Определение площади акватории озёр по данным дистанционного зондирования Земли и ГИС-технологий // Естественные и технические науки. 2016. № 11(101). С. 106–109. EDN: XSCCBD
11. Дьяченко А. В., Безматерных Д. М. Батиметрические исследования озера Пясино (Красноярский край) в 2022 году // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2024. № 2(73). С. 55–64. DOI: 10.24412/2410-1192-2024-17304 EDN: DBOORF
12. Корниенко С. Г. Оценка погрешности измерения площади водоёмов в криолитозоне по данным космической съёмки различного пространственного разрешения // Методы исследования Криотосферы. Криосфера Земли. 2014. Т. XVIII, № 4. С. 86–93. EDN: SZHBYJ
13. Краткая географическая энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия, 1962. Т. 3. 563 с.
14. Курганович К. А., Носкова Е. В. Использование водных индексов для оценки изменения площадей водного зеркала степных содовых озёр юго-востока Забайкалья, по данным дистанционного зондирования // Вестн. Забайкальского гос. ун-та. 2015. № 6(121). С. 16–24. EDN: UMMZLJ
15. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши: часть 1 – Реки и каналы; часть 2 – Озера и водохранилища. Т. 1 РСФСР. Вып. 12 Бассейны Енисея (без бассейна Ангары) и Пясины. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 464 с.
16. Морозова В. А. Расчет индексов для выявления и анализа характеристик водных объектов с помощью данных дистанционного зондирования // Современные проблемы территориального развития. 2019. № 2. С. 1–12. EDN: ZGUGUB
17. Никаноров А. М., Иванов В. В., Брызгалов В. А. Реки Российской Арктики в современных условиях антропогенного воздействия. Ростов н/Д: Изд-во «НОК», 2007. 280 с.

Гидрология

Дьяченко А. В., Безматерных Д. М.

18. Пармузин Ю. П., Кириллов М. В., Щербаков Ю. А. Физико-географическое районирование Красноярского края // Материалы по физико-географическому районированию СССР (Сибирь и Дальний Восток). М.: Изд-во Моск. ун-та, 1964. С. 5–70.
19. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 16. Ангара-Енисейский район. Вып. 1. Енисей / под ред. Г. С. Карабаева. Л.: Гидрометеониздат, 1967. 823 с.
20. Румянцев В. А., Драбова В. Г., Измайлова А. В. Озера азиатской части России. СПб: Свое издательство, 2017. 480 с. ISBN: 978-5-4386-1415-9 EDN: FBYHMR
21. Румянцева Е. В. Анализ многолетней изменчивости водных ресурсов Норило-Пясинской озерно-речной системы в условиях антропогенного воздействия: дис. ... канд. геог. наук / Институт озероведения РАН. СПб, 2012. 116 с. EDN: QFVETT
22. Таймыро-Североземельская область (Физико-географическая характеристика) / под ред. Р. К. Сиско. Л.: Гидрометеониздат, 1970. 374 с.
23. ArcGIS Pro : website. URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/help/data/imagery/indices-gallery.htm> (дата обращения: 01.11.2022)
24. Kshetri T. NDVI, NDBI & NDWI Calculation Using Landsat 7, 8 // GeoWorld. 2022. Vol. 2. P. 32–34.
25. European Spase Agency: website. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/radiometric> (дата обращения: 01.11.2022)
26. OpenTopography: website. URL: <https://doi.org/10.5069/G9028PQB> (дата обращения: 01.11.2022). DOI: 10.5069/G9028PQB
27. USGS : website. URL: <https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites> (дата обращения: 01.11.2022)
28. Xu H. Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery // International Journal of Remote Sensing. 2006. Vol. 27, No. 14. P. 3025–3033. DOI: 10.1080/01431160600589179

References

1. Bezmaternykh D. M. Otsenka potentsiala samoochishcheniya ozera Pyasino (Krasnoyarskii krai) [Assessment of the Self-Purification Potential of Lake Pyasino (Krasnoyarsk Region)]. *Geography and Natural Resources*, 2024, no. 2, pp. 88–94. (In Russ.)
2. Bezmaternykh D. M., Gubarev M. S., D'yachenko A. V., Sviridov R. K., Vagner A. A. Gidrologicheskii rezhim rek Norilo-Pyasinskoi ozerno-rechnoi sistemy (Krasnoyarskii krai) v 2021 godu [Hydrological regime of the rivers of the Norilo-Pyasinskaya lake-river system (Krasnoyarsk Krai) in 2021]. In *Vodnye i ekologicheskie problemy Sibiri i Tsentral'noi Azii: Mat. IV Vseros. nauch. konf. s mezhdunar. uchast. (Barnaul, 29 avgusta–3 sentyabrya 2022 g.)*. Barnaul, 2022, vol. 1, pp. 70–74. (In Russ.) EDN: KLGDOY
3. Bezmaternykh D. M., Puzanov A. V., Kotovshchikov A. V., Drobotov A. V., Tolomeev A. P. Hydrochemical indicators of water quality in the Norilsk–Pyasino lake–river system after a diesel fuel spill at Norilsk heat and power plant 3 in 2020. *Contemporary Problems of Ecology*, 2021, no. 4, pp. 408–422. (In Russ.) DOI: 10.15372/SEJ20210402 EDN: QPRAHH
4. Bryzgalo V. A., Ivanov V. V., Zamyatin V. Yu., Makeev V. M. *Chrezvychaynye ekologicheskie situatsii v raionakh Rossiiskogo Severa* [Emergency environmental situations in the Russian North]. Saint Petersburg: Izd-vo GPA, 2004. 82 p. (In Russ.) EDN: YAIHIZ
5. *Voda Rossii: nauchno-populyarnaya entsiklopediya* [Water of Russia: Popular Science Encyclopedia]. (In Russ.) URL: <https://water-ru.ru> Accessed 25 October 2020).
6. *Geografiya ozer Taimyra* [Geography of the Taimyr Lakes]. Ed. by V. N. Adamenko, A. N. Egorov. Leningrad: Nauka, 1985. 224 p. (In Russ.)
7. GOST R 59054-2020. *Okhrana okruzhayushchei sredy. Poverkhnostnye i podzemnye vody. Klassifikatsiya vodnykh ob'ekтов* [GOST R 59054-2020. Environmental protection. Surface and groundwater. Classification of water bodies]. 24 p.
8. *Doklad "O sostoyanii i ispol'zovanii vodnykh resursov Rossiiskoi Federatsii v 2020 godu "* [Report on the State and Use of Water Resources in the Russian Federation in 2020]. Moscow: Rosvodresursy, NIA-Priroda, 2022. 510 p. (In Russ.)
9. Domanitskii A. P., Dubrovina R. G., Isaeva A. I. *Reki i ozera Sovetskogo Soyuza. Spravochnye dannye* [Rivers and Lakes of the Soviet Union. Reference Data]. Leningrad: Gidrometeorologicheskoe izdatel'stvo, 1971. 104 p. (In Russ.)
10. Dontsov A. A., Sutorikhin I. A. Opredelenie poshchadi akvatorii ozer po dannym distantsionnogo zondirovaniya Zemli i GIS-tekhologii [Determination of Lake Water Areas Using Remote Sensing and GIS Technologies]. *Natural and Technical Sciences*, 2016, no. 11(101), pp. 106–109. (In Russ.) EDN: XSCCBD
11. Dyachenko A. V., Bezmaternykh D. M. Bathymetric studies of lake Pyasino (Krasnoyarsk krai) in 2022. *Bulletin AB RGS [IZVESTIÁ AO RGO]*, 2024, no. 2(73), pp. 55–64. (In Russ.) DOI: 10.24412/2410-1192-2024-17304 EDN: DBOORF
12. Kornienko S. G. Otsenka pogreshnosti izmereniya ploshchadi vodoemov v kriolitozone po dannym kosmicheskoi s'emki razlichnogo prostranstvennogo razresheniya [Estimation of the Error in Measuring the Area of Water Bodies in the Cryolithozone Based on Space Imagery Data of Various Spatial Resolution]. *Methods of Cryosphere Research. Earth's Cryosphere*, 2014, vol. XVIII, no. 4, pp. 86–93. (In Russ.) EDN: SZHBYJ
13. *Kratkaya geograficheskaya entsiklopediya*. Vol. 3 [A short geographical encyclopedia. Vol. 3.]. Moscow: Sov. entsiklopediya, 1962. 563 p. (In Russ.)
14. Kurganovich K. A., Noskova E. V. Ispol'zovanie vodnykh indeksov dlya otsenki izmeneniya ploshchadei vodnogo zerkala stepnykh sodovykh ozer yugo-vostoka Zabaikal'ya, po dannym distantsionnogo zondirovaniya [The use of water indices to estimate changes in the water mirror areas of steppe soda lakes in southeastern Transbaikalia, according to remote sensing data]. *Transbaikalian State University Journal*, 2015, no. 6(121), pp. 16–24. (In Russ.) EDN: UMMZLJ
15. *Mnogoletnie dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi: chast' 1 – Reki i kanaly; chast' 2 – Oзера i vodokhranilishcha*. Vol. 1 RSFSR. Vyp. 12 Basseiny Eniseya (bez basseina Angary) i Pyasiny [Long-term data on the regime and resources of land surface waters: part 1 – Rivers and channels; part 2 – Lakes and reservoirs. Vol. 1 RSFSR. Issue 12 basins.seya (without Angara pool) and Pyasiny. L. N.: Gidrometeoizdat, 1985. p. 464.]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985. 464 p. (In Russ.)

Гидрология

Дьяченко А. В., Безматерных Д. М.

16. Morozova V. A. Raschet indeksov dlya vyyavleniya i analiza kharakteristik vodnykh ob'ektov s pomoshch'yu dannykh distantsionnogo zondirovaniya [Calculation of indices for identifying and analyzing the characteristics of water bodies using remote sensing data]. *Sovremennye problemy territorial'nogo razvitiya*, 2019, no. 2, pp. 1–12. (In Russ.) EDN: ZGXGUB
17. Nikanorov A. M., Ivanov V. V., Bryzgalo V. A. *Reki Rossiiskoi Arktiki v sovremennykh usloviyakh antropogennogo vozdeistviya* [Rivers of the Russian Arctic in the Current Conditions of Anthropogenic Impact]. Rostov-na-Donu: Izd-vo NOK, 2007. 280 p. (In Russ.)
18. Parmuzin Yu. P., Kirillov M. V., Shcherbakov Yu. A. *Fiziko-geograficheskoe raionirovanie Krasnoyarskogo kraya* [Physical and Geographical Zoning of the Krasnoyarsk Region]. *Materials on the Physical-Geographical Zoning of the USSR (Siberia and the Far East)*. Moscow: Izd-vo Mock, un-ta, 1964, pp. 5–70. (In Russ.)
19. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR: Gidrologicheskaya izuchennost'. Vol. 16. Angaro-Eniseiskii raion. Vyp. 1. Enisei* [Surface Water Resources of the USSR: Hydrological Study. Vol. 16. Angara-Yenisei Region. Issue 1. Yenisei]. Ed. by G. . Karabaeva. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1967. 823 p. (In Russ.)
20. Rumyantsev V. A., Drabkova V. G., Izmailova A. V. *Ozera aziatskoi chasti Rossii* [Lakes of the Asian Part of Russia]. Saint Petersburg: Svoe izdatel'stvo, 2017. 480 p. (In Russ.) ISBN: 978-5-4386-1415-9 EDN: FBYHMR
21. Rumyantseva E. V. *Analiz mnogoletnei izmenchivosti vodnykh resursov Norilo-Pyasinskoi ozerno-rechnoi sistemy v usloviyakh antropogennogo vozdeistviya* [Analysis of Long-Term Variability of Water Resources in the Norilsk-Pyasinsk Lake-River System under Anthropogenic Impact]. Cand. Sc. dissertation, Institute of Lake Science of the Russian Academy of Sciences. Saint Petersburg, 2012. 116 p. (In Russ.) EDN: QFVETT
22. *Taimyro-Severozemel'skaya oblast' (Fiziko-geograficheskaya kharakteristika)* [Taimyr-Severozemelskaya Region (Physiographic Characteristics)]. Ed. by R. K. Sisko. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970. 374 p. (In Russ.)
23. ArcGIS Pro. URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/help/data/imagery/indices-gallery.htm> (Accessed 01 November 2022).
24. Kshetri T. NDVI, NDBI & NDWI Calculation Using Landsat 7, 8 // *GeoWorld*. 2022. Vol. 2. Pp. 32–34.
25. European Space Agency. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/radiometric> (Accessed 01 November 2022).
26. OpenTopography. URL: <https://doi.org/10.5069/G9028PQB> (Accessed 01 November 2022).
27. USGS. URL: <https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites> (Accessed 01 November 2022).
28. Xu H. Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, vol. 27, no. 14, pp. 3025–3033. DOI: 10.1080/01431160600589179

Статья поступила в редакцию: 03.04.26, одобрена после рецензирования: 30.04.26, принята к опубликованию: 12.09.26.

The article was submitted: 3 April 2026; approved after review: 30 April 2026; accepted for publication: 12 September 2026.

Информация об авторах

Александр Владимирович Дьяченко

Научный сотрудник,

Институт водных и экологических проблем

Сибирского отделения Российской академии наук;

656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1

ORCID: 0000-0003-4178-8415,

eLibrary AuthorID: 661734

Information about the authors

Alexander V. Dyachenko

Researcher,

Institute for Water and Environmental Problems,

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 1,

Molodezhnaya st., Barnaul, 656038, Russia

ORCID: 0000-0003-4178-8415,

eLibrary AuthorID: 661734

e-mail: dyachenko@iwep.ru

Дмитрий Михайлович Безматерных

Доктор биологических наук, доцент,

заместитель директора по научной работе,

Институт водных и экологических проблем

Сибирского отделения Российской академии наук;

656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1

ResearcherID: D-6202-2013, Scopus Author ID:

15753330300, ORCID: 0000-0002-7747-4939,

AuthorID РИНЦ: 97009

Dmitry M. Bezmaternykh

Doctor of Biological Sciences, Associate Professor,

Deputy Director for Science, Institute for Water and

Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian

Academy of Sciences;

1, Molodezhnaya st., Barnaul, 656038, Russia

ResearcherID: D-6202-2013, Scopus Author ID:

15753330300, ORCID: 0000-0002-7747-4939,

eLibrary AuthorID: 97009

e-mail: bezmater@iwep.ru

Вклад авторов

Дьяченко А. В. – выполнение полевых и камеральных исследований, подготовка первого варианта рукописи и рисунков, вычитка финального варианта статьи.

Безматерных Д. М. – идея статьи, постановка задач исследования, организация полевых работ, участие в экспедиционных работах, вычитка финального варианта статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

Alexander V. Dyachenko – field and laboratory studies; preparation of the first version of the manuscript and figures; proofreading of the final version of the article.

Dmitry M. Bezmaternykh – the idea of the article; setting of the research objectives; organization of field works; participation in field works; proofreading of the final version of the article.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.