



**ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ, ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ И ГЕОХИМИЯ
ЛАНДШАФТОВ/PHYSICAL GEOGRAPHY AND BIOGEOGRAPHY, SOIL GEOGRAPHY AND LANDSCAPE
GEOCHEMISTRY**

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.52> EDN: [QTSFRD](#)

**КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К МОНИТОРИНГУ СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ВЫСОКОГОРНЫХ
ЭКОСИСТЕМ МУЛЬТИНСКИХ ОЗЕР ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Научная статья

Трапезникова К.И.^{1,*}, Ровенский М.К.²

¹ORCID : 0009-0009-7629-2285;

^{1,2} Южный Федеральный Университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (ksuxanas[at]mail.ru)

Аннотация

В статье представлена апробация комплексного алгоритма обработки спутниковых данных для оценки внутрigoдовой динамики водной поверхности, снежного и растительного покрова высокогорного озерного комплекса на примере Мультинских озер (Республика Алтай). Цель исследования — разработка и тестирование воспроизводимого мультииндексного подхода к совместному анализу взаимосвязанных природных компонентов в пределах единой буферной зоны. В качестве исходных данных использованы 17 сцен Landsat 8–9 за 2024 год. Обработка выполнялась с применением индексов NDVI, MNDWI и NDSI с маскированием облачности и классификацией. Реализованный алгоритм позволил провести согласованный анализ сезонных изменений растительности, водной поверхности и снежного покрова. Установлено, что в теплый период площадь водного зеркала варьировала в пределах 3–4 км² с максимумом в октябре и минимумом в июле, при этом максимальные значения NDVI фиксировались в июле. Совместное использование трех индексов позволило уточнить интерпретацию водной поверхности в условиях частичного перекрытия льдом и снегом. Научная новизна работы заключается в реализации мультииндексного алгоритма в анализе единой озерной буферной системы. Практическая значимость состоит в возможности применения предложенного подхода для дистанционного мониторинга труднодоступных высокогорных озер дирекциями ООПТ, водохозяйственными и научными организациями.

Ключевые слова: Мультинские озера, Республика Алтай, дистанционное зондирование Земли, сезонная динамика, NDVI, MNDWI, NDSI.

**A COMPLEX APPROACH TO MONITORING SEASONAL CHANGES IN THE HIGH-ALTITUDE ECOSYSTEMS
OF THE MULTA LAKES BASED ON REMOTE SENSING DATA**

Research article

Trapeznikova X.I.^{1,*}, Rovenskii M.K.²

¹ORCID : 0009-0009-7629-2285;

^{1,2} Southern Federal University, Ростов-на-Дону, Russian Federation

* Corresponding author (ksuxanas[at]mail.ru)

Abstract

The article presents the testing of a complex algorithm for processing satellite data to evaluate the intra-annual dynamics of the water surface, snow cover, and vegetation cover of a high-mountain lake complex on the example of the Multa Lakes (Republic of Altai). The aim of the study is to develop and test a reproducible multi-index approach to the joint analysis of interrelated natural components within a single buffer zone. Data from 17 Landsat 8–9 scenes for 2024 were used as source data. The processing was performed using NDVI, MNDWI, and NDSI indices with cloud masking and classification. The implemented algorithm allowed for a coordinated analysis of seasonal changes in vegetation, water surface, and snow cover. It was found that during the warm period, the water surface area varied between 3 and 4 km², with a maximum in October and a minimum in July, while the maximum NDVI values were recorded in July. The combined use of the three indices made it possible to clarify the interpretation of the water surface in conditions of partial coverage by ice and snow. The scientific novelty of the work lies in the implementation of a multi-index algorithm in the analysis of a unified lake buffer system. The practical significance lies in the possibility of applying the suggested approach for remote monitoring of hard-to-reach high-altitude lakes by nature reserve administrations, water management and scientific organisations.

Keywords: Multa Lakes, Altai Republic, remote sensing of Earth, seasonal dynamics, NDVI, MNDWI, NDSI.

Введение

В условиях современного изменения климата высокогорные экосистемы Алтая относятся к числу наиболее чувствительных природных систем. Региональные климатические трансформации выражаются в повышении температуры воздуха и изменении режима осадков, что оказывает влияние на ледниковые и озерные комплексы [1]. К началу XXI века ледниковые системы региона демонстрируют устойчивую тенденцию к сокращению, отражающую долгосрочную перестройку климатических условий [2]. Деградация оледенения сопровождается изменением структуры питания горных водоемов и перераспределением сезонной роли талых вод.

Для озер, расположенных в зоне ледниково-снежного питания, данные процессы могут проявляться в трансформации внутригодовой динамики площади водного зеркала, изменении снежного покрова и особенностях прибрежных экосистем [2]. При этом высокогорное положение и труднодоступность территории существенно ограничивают возможности проведения регулярных полевых наблюдений, что затрудняет получение сопоставимых данных о сезонных изменениях компонентов озерной экосистемы.

В данной ситуации методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) выступают ключевым инструментом исследования и мониторинга высокогорных природных комплексов. Спутниковые данные обеспечивают регулярность наблюдений и позволяют проводить одновременную оценку водной поверхности, снежного покрова и состояния растительности. Вместе с тем в ряде исследований анализ взаимосвязей природных компонентов осуществляется преимущественно на основе сравнения отдельных спектральных индексов с климатическими параметрами [16], [17]. Так, в работе Schultz P.A. и Halpert M.S. выполнен глобальный анализ пространственной изменчивости корреляций между NDVI, температурой и осадками на основе данных AVHRR с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ [16]. Авторами выявлены широтные закономерности климатического ограничения растительности и показан потенциал совместного использования NDVI и температуры для мониторинга биоклимата. Однако глобальный масштаб исследования и крупное пространственное усреднение не позволяют учитывать морфологические особенности конкретных природных комплексов, включая высокогорные озерные системы. В исследованиях регионального уровня, включая работу Гусева А. П. [17], основное внимание уделяется многолетней динамике NDVI как индикатора состояния растительного покрова и его связи с климатическими трендами. При этом анализ, как правило, сосредоточен на одном спектральном индексе и ориентирован на выявление межгодовых изменений, без одновременной оценки водной поверхности и снежного покрова в пределах одной озерной экосистемы. Схожий моноиндексный подход реализован и в исследованиях горных территорий. Так, П.А. Шарый и Л.С. Шарая анализировали пространственную изменчивость NDVI горных лесов Северного Кавказа во взаимосвязи с климатическими и геоморфометрическими факторами [18]. Несмотря на учет рельефа и температурных условий, работа ограничена оценкой только растительного компонента без рассмотрения водных и нивальных процессов. В работах, посвященных непосредственно озерным системам, акцент чаще делается на динамике акватории. Например, Н. Yue, Y. Liu и соавторы исследовали многолетние изменения площади озера Hongjiannaо на основе водного индекса MNDWI [19], что позволило выявить сезонные колебания водного зеркала. Однако использование одного водного индекса не дает возможности оценить сопряженные изменения снежного питания и растительности озера. Изменения природных комплексов Алтайского региона на бассейновом уровне рассмотрены в работе Д.В. Черных и соавторов [20], где проанализирована пространственно-временная динамика ландшафтов водосборов за длительный период. Вместе с тем исследование ориентировано на межгодовые ландшафтные трансформации и не затрагивает детальную внутригодовую взаимосвязанную динамику водной поверхности, снежного покрова и растительности в пределах отдельных высокогорных озер.

Таким образом, несмотря на наличие работ, посвященных анализу связей NDVI с климатическими параметрами, комплексная оценка внутригодовой взаимосвязанной динамики водной, снежной и растительной переменных в пределах конкретного высокогорного озерного комплекса остается недостаточно разработанной.

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки дистанционного подхода к оценке сезонных изменений водной поверхности, снежного покрова и растительности в пределах единого высокогорного озерного комплекса. Реализация такого подхода позволяет перейти от разрозненного анализа отдельных показателей к целостной характеристике функционирования озерной экосистемы.

Научная новизна заключается в разработке и апробации алгоритма интегрированного мультииндексного анализа, основанного на одновременном применении трех спектральных индексов. В отличие от существующих исследований, использующих один индекс или их парные сочетания, предложенный подход обеспечивает системное рассмотрение сезонных взаимосвязей компонентов нивально-озерных экосистем.

Применение только одного индекса позволяет оценить состояние отдельного природного компонента без учета факторов его формирования. Использование двух индексов расширяет аналитические возможности, однако не дает целого представления о последовательности сезонных процессов, включая трансформацию снежного питания, изменение площади водного зеркала и отклик прибрежной растительности. Одновременный анализ трех индексов позволяет проследить связь «снежный покров — гидрологический режим озера - состояние растительности».

Так, разработанный алгоритм реализован в условиях высокогорных озер Алтая, что ранее не выполнялось в дистанционных исследованиях региона. В отличие от бассейновых, глобальных и моноиндексных работ, предложенный подход ориентирован на детальный внутригодовой анализ динамики взаимосвязанных природных компонентов в пределах конкретного озерного комплекса ледниково-снежного питания.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования алгоритма для мониторинга труднодоступных озерных систем. Результаты могут быть применены структурами Росгидромета, дирекциями ООПТ, водохозяйственными и научными организациями при оценке сезонной водности, состояния экосистем и последствий климатических изменений в горных регионах.

Объектом исследования выбраны Мультиинские озера, расположенные в Усть-Коксинском районе Республики Алтай на территории Катунского заповедника. Каскад трех озер протягивается вдоль северного склона Катунского хребта в верхнем течении реки Мульта. Озера имеют моренно-подпрудное происхождение и сформированы деятельностью ледника в один из периодов похолодания [3]. Питание осуществляется водами реки Мульта и притоками, формирующимися за счет сезонного таяния ледников и снежников.

Верхнее Мультиинское озеро расположено на высоте 1799 м над уровнем моря ($49^\circ 55' 01''$ с.ш., $85^\circ 50' 40''$ в.д.) и имеет площадь 0,42 км². В 6,5 км ниже по течению находится Среднее Мультиинское озеро (1648 м; $49^\circ 59' 01''$ с.ш., $85^\circ 49' 43''$ в.д.) площадью 0,92 км². Нижнее Мультиинское озеро (1629 м; $50^\circ 0' 9.14''$ с.ш., $85^\circ 49' 52''$ в.д.) отделено от

Среднего мореной, по которой формируется водопад Шумы высотой около 20 м [15]. Береговые участки озер различаются по морфологическим условиям: западные и восточные представлены крутыми склонами хребтов, южные приурочены к зонам впадения реки Мульга, северные характеризуются заболоченностью либо наличием моренных отложений [5]. Почвенный покров водосбора подчинен высотной зональности: для берегов Среднего и Нижнего озер характерны бурые горно-лесные почвы, сменяющиеся в направлении Верхнего озера субальпийскими [5]. Растительность прибрежной зоны разнообразна: в лесах преобладают кедровая сосна (*Pinus sibirica*) и лиственница (*Larix sibirica*), подлесок представлен травами и кустарниками, например, жимолость (*Lonicera*), брусника (*Vaccinium vitis-idaea*), также можно встретить грибы и лишайники: кладония оленья (*Cladonia rangiferina*), аскомицеты (*Ascomycota*).

Мультииндексные озера являются памятником природы республиканского значения [7], что определяет необходимость разработки инструментов регулярного дистанционного мониторинга их состояния в условиях климатической трансформации и возрастающей антропогенной нагрузки.

Целью исследования является разработка и апробация комплексного мультииндексного подхода к оценке внутригодовой динамики высокогорной озерной экосистемы на основе данных дистанционного зондирования Земли.

Материалы и методы

Для исследования использовались данные спутниковой съемки Landsat 8-9 OLI/TIRS Collection 2 Level-1, предоставляемые Геологической службой США (USGS) [8]. Выбор данных Landsat обусловлен оптимальным сочетанием пространственного разрешения (30 м) и временной повторяемости съемки (16 дней), что позволяет фиксировать сезонную динамику природных компонентов в пределах относительно небольших высокогорных озерных комплексов.

В анализ включены 17 сцен 2024 года (таблица 1), отобранных с учетом минимальной облачности над сценой и территорией исследования. Использование данных одного календарного года позволило проследить внутригодовую динамику водной поверхности, снежного покрова и растительности в пределах озерной системы.

Таблица 1 - Использованные спутниковые снимки

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.52.1>

№	Идентификатор снимка	Дата съемки	Облачность (%)	
			над сценой	Над сушей
1	LC81450252024013 LGN00	13.01.2024	10,79	10,79
2	LC91450252024021 LGN00	21.01.2024	2,20	2,20
3	LC81450252024029 LGN00	29.01.2024	7,87	7,87
4	LC91450252024037 LGN00	06.02.2024	0,55	0,55
5	LC91450252024053 LGN00	22.02.2024	0,42	0,42
6	LC81450252024061 LGN00	01.03.2024	0,87	0,87
7	LC91450252024069 LGN00	09.03.2024	16,81	16,81
8	LC81450252024093 LGN00	02.04.2024	10,09	10,09
9	LC81450252024141 LGN00	20.05.2024	16,07	16,07
10	LC81450252024173 LGN00	21.06.2024	6,76	6,76
11	LC91450252024181 LGN01	29.06.2024	8,59	8,59
12	LC91450252024197 LGN00	15.07.2024	5,68	5,68
13	LC91450252024229 LGN00	16.08.2024	14,38	14,38
14	LC81450252024285 LGN00	11.10.2024	19,83	19,83
15	LC91450252024325 LGN00	20.11.2024	0,93	0,93

№	Идентификатор снимка	Дата съемки	Облачность (%)	
			над сценой	Над сушей
16	LC81450252024333 LGN00	28.11.2024	0,71	0,71
17	LC91450252024341 LGN00	06.12.2024	2,86	2,86

Обработка спутниковых данных выполнялась в программной среде ArcGIS 10.5. Границы Мультиинских озер получены на основе данных OpenStreetMap (OSM), выгруженных посредством плагина QGIS [4]. На основе полигона озер сформирована буферная зона шириной 500 м. Выбор буферной зоны обусловлен необходимостью учета прибрежных экосистем, непосредственно реагирующих на сезонные изменения уровня воды.

В процессе обработки материалов спутниковой съемки последовательно были восстановлены коэффициенты спектральной яркости (КСЯ), созданы и вырезаны маски облачности, рассчитаны и классифицированы по значениям спектральные индексы (согласно рис. 1). Маскирование облачности выполнялось на основе официального слоя Pixel Quality Assessment (QA_PIXEL) с использованием кодов классификации таблицы 6–3 [9]. Применение масок облаков и теней минимизирует влияние атмосферных искажений и особенностей горного рельефа на точность классификации. Для оценки динамики растительного покрова был рассчитан нормализованный дифференциальный индекс растительности NDVI по [10]. Для оценки динамики водного зеркала и снежного покрова рассчитывались MNDWI и NDSI и разделялись значениями 0.4 [11], [12]. Band 5, Band 4, Band 3 и Band 6 использовались соответственно, как NIR, Red, Green и SWIR каналы. Рассматривались положительные полученные значения NDVI, классифицированные с шагом 0,1 в соответствии с методическими подходами [13]. Положительные значения MNDWI/NDSI интерпретировались как водная поверхность и снежный покров. Алгоритм выполнения исследования представлен на рис. 1.

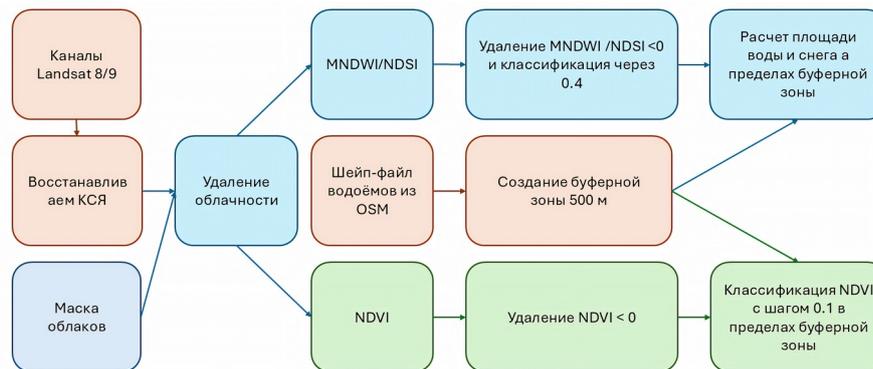


Рисунок 1 - Алгоритм обработки спутниковых снимков для получения данных о водной поверхности, снежном покрове и растительности

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.52.2>

Совместное использование NDVI и MNDWI/NDSI в пределах единой буферной зоны позволило провести комплексную оценку взаимосвязанной сезонной динамики растительности, водной поверхности и снежного покрова. Такой мультииндексный подход показывает общую характеристику озерной системы и снижает риск интерпретационных ошибок, возникающих при анализе одного показателя.

Дополнительно для построения климатограмм использовались ежедневные данные температуры воздуха и осадков [14], что позволило сопоставить сезонные изменения спектральных характеристик с метеорологическими условиями рассматриваемого года.

Морфометрические характеристики озер (длина, ширина, периметр, средняя ширина) определялись с использованием инструментов Google Earth [15] по снимкам от 24.07.2024 года.

Все этапы обработки данных выполнялись по унифицированному алгоритму (рис. 1), что обеспечивает воспроизводимость методики и возможность ее применения для дистанционного мониторинга других высокогорных озерных систем при наличии аналогичных спутниковых данных.

Результаты и обсуждения

Для расчета морфометрических показателей для озер помимо площади были посчитаны длина, ширина, периметр и средняя ширина озера. Длина составила 1,38, 1,67, 2,66 км, ширина: 0,33, 0,68, 0,80 км, периметр: 3,64, 4,44, 6,50 км, средняя ширина: 0,30, 0,55, 0,69 км от Верхнего к Нижнему озеру соответственно. По внешнему облику озера очень похожи (рис.2), это подтвердилось подсчетами показателя компактности, который очень схож между ними и составил 0,91, 0,81, 0,86 от Верхнего к Нижнему, соответственно. Показатель удлиненности озера отличается сильнее, самый большой на Верхнем (4,6), в Среднем и Нижнем 3,03 и 3,85 соответственно. Показатели развития береговой линии озер характеризуются небольшими различиями и изменяются от 2,51 до 2,71.



Рисунок 2 - Объекты исследования
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.52.3>

Примечание: по ист. [3]

Динамика температуры воздуха и площади водного зеркала в течение 2024 года представлена на рис. 3. В динамике водного зеркала выражены отрезки, когда площадь озер увеличивается, а температура при этом снижается, это заметно 6 февраля, 1 марта и 20 ноября. Велика вероятность интерпретации снега или льда вместо воды. Также, алгоритмом зафиксирован отрезок с 20 мая по 16 августа, когда температура повышается, а площадь водного зеркала уменьшается.

Среднегодовая сумма осадков в районе озер варьируется в пределах от 550 до 650 мм. Сезон дождей отмечается в период с мая по июль. Уровень воды имеет максимальные значения в мае и июле, в первом случае из-за активного

поступления воды из ледников, во втором — пиковых значений осадков [6]. На графике (рис.3) зафиксировано, что площадь озера увеличивается соответственно пикам осадков.

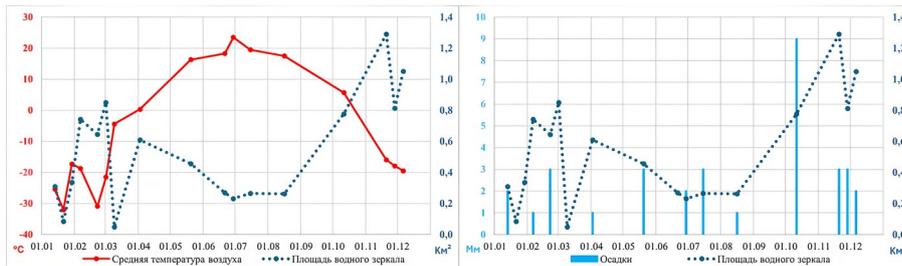


Рисунок 3 - Динамика температуры воздуха, осадков и площади водного зеркала (MNDWI) в 2024 году
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.52.4>

Отмечается обратная зависимость между площадью снежного покрова и температурой воздуха (рис. 4). Так, когда температура растет — снежный покров уменьшается. Исключением является 2 апреля, когда отмечалось увеличение покрова при увеличении температуры.

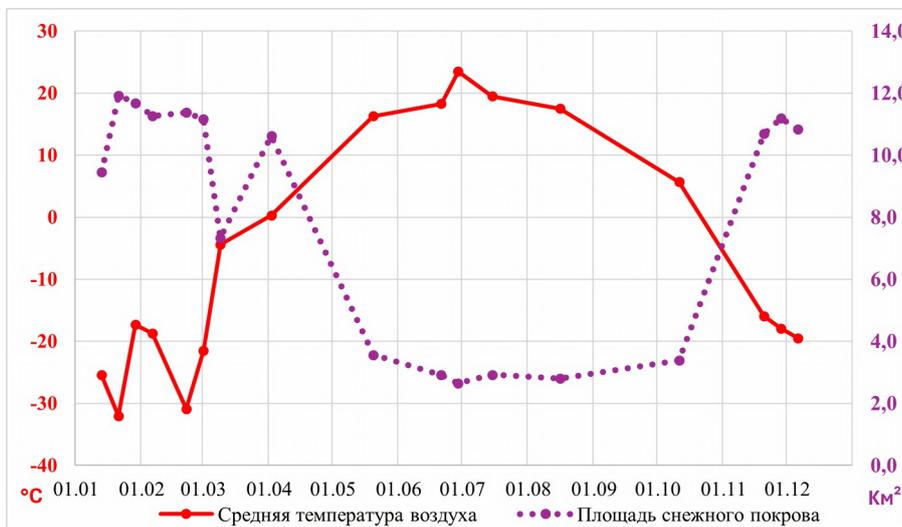


Рисунок 4 - Динамика площади снежного покрова (NDSI) с температурой воздуха в 2024 году
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.52.5>

Можно отметить, что данные MNDWI и NDSI, полученные для летнего периода, отражают площадь озер более четко. Например, площадь водного зеркала на 16 августа — 0,262 км², а площадь снежного покрова — 2,802 км², их сумма равна 3,064 км², что приближено к средней площади озер. Значит в другие сезоны снег и лед, покрывающие озера и прибрежные части, мешают точным исследованиям с помощью методов дистанционного зондирования Земли.

Согласно рис. 5, колебания водного и снежного индексов озер соответствуют динамике средних значений густоты растительности. С января по апрель, несмотря на снежный покров, наблюдается небольшое повышение густоты, далее весной — летом площадь уже водного зеркала становится стабильной, а значение густоты увеличивается до максимума 15 июля, далее отрезок осень — зима отличается увеличением снежного покрова и резким уменьшением густоты растительности. Это явление напрямую показывает зависимость растительного покрова от водной и снежной изменчивости. Также можно отметить изменение площади водного зеркала в теплый период с положительными температурами, так, 20 мая — 4,02 км², 15 июля — 3,19 км² и 11 октября — 4,16 км², данная динамика соответствует водному режиму и отличается стабильностью.

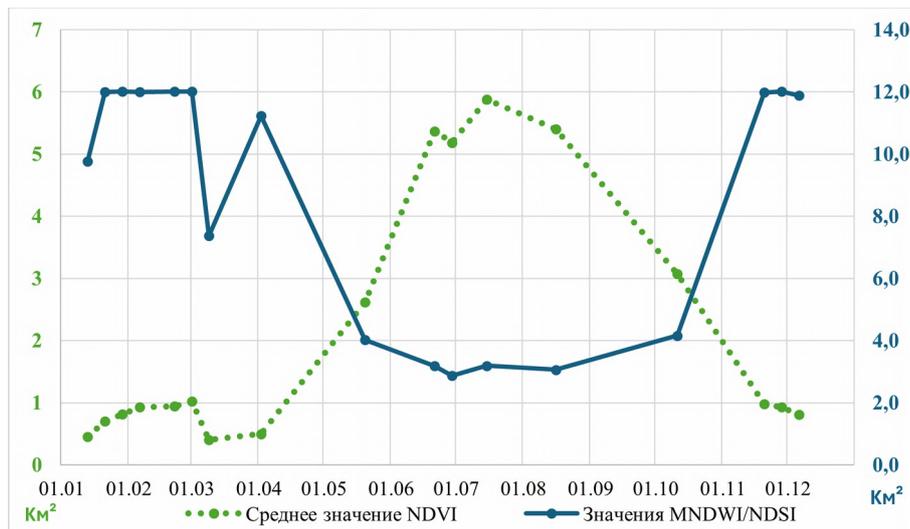


Рисунок 5 - Динамика растительного покрова (NDVI) и водного + снежного покровов (MNDWI+NDSI) в 2024 году
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.52.6>

Заключение

В работе разработан и апробирован воспроизводимый алгоритм комплексной обработки спутниковых данных Landsat 8–9 для совместного анализа водной поверхности, снежного покрова и растительности в пределах единого высокогорного озерного комплекса. В отличие от исследований, основанных на использовании одного спектрального индекса, предложенный мультииндексный подход (NDVI, MNDWI, NDSI) реализован в границах единой 500-метровой буферной зоны, что позволяет учитывать взаимосвязанную динамику природных компонентов и снижает вероятность интерпретационных ошибок в условиях сезонного перекрытия воды льдом и снегом.

Апробация алгоритма на примере Мультигинских озер показала, что в течение 2024 года площадь водного зеркала в теплый период варьировалась в пределах 3–4 км² с максимумом в октябре и минимумом в июле, тогда как максимальные значения NDVI фиксировались в июле и соответствовали периоду устойчивых положительных температур. В холодный сезон отмечено закономерное увеличение площади снежного покрова и снижение показателей растительности. Совместный анализ индексов позволил выявить согласованность сезонных изменений и уточнить особенности интерпретации водной поверхности в переходные периоды.

Исследование носит характер методической апробации на материалах одного календарного года, однако предложенный алгоритм может быть масштабирован для многолетнего мониторинга и применен к другим высокогорным озерным системам различного типа.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанного подхода для регулярного дистанционного мониторинга высокогорных озер, расположенных в пределах особо охраняемых природных территорий, где проведение систематических полевых наблюдений ограничено. Методика обеспечивает получение сопоставимых данных о сезонной динамике водной поверхности, снежного покрова и растительности без нарушения режима охраны.

Дополнительная прикладная ценность связана с возможностью использования результатов для оценки вклада снежно-ледникового питания в формирование водности озер, ранней диагностики их обмеления или переразвития акватории, а также отслеживания отклика прибрежных экосистем. Информация может применяться природоохранными дирекциями ООПТ, гидрометеорологическими службами и научными организациями при мониторинге состояния высокогорных систем, прогнозе водных ресурсов и обосновании управленческих решений в условиях климатических изменений.

**Финансирование**

Исследование выполнено в рамках программы поддержки от АО «АЛЬФА_БАНК» «Альфа будущее Гранты преподавателям».

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность Михайленко Анне Владимировне, кандидату географических наук, доценту кафедры физической географии, экологии и охраны природы Института наук о Земле Южного федерального университета, за консультации и помощь в совершенствовании работы.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The study was conducted as part of the Alfa Future Grants for Teachers program, supported by SC ALFA-BANK.

Acknowledgement

The authors express their sincere gratitude to Mikhailenko Anna Vladimirovna, PhD in Geography, Associate Professor of the Chair of Physical Geography, Ecology and Nature Conservation at the Institute of Earth Sciences of Southern Federal University, for her advice and assistance in improving the work.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Под ред. А.И. Бедрицкого. — Москва: ИГКЭ Росгидромета и РАН, 2014. — 1009 с.
2. Нарожный Ю.К. Современное оледенение Алтая на рубеже XXI века / Ю.К. Нарожный, С.А. Никитин // *Материалы гляциологических исследований*. — 2003. — № 95. — С. 3–12.
3. Бородина Е.В. Формирование химического состава озерных вод особо охраняемых территорий Горного Алтая на примере бассейна р. Мульты / Е.В. Бородина, У.О. Бородина // *Водные ресурсы*. — 2019. — Т. 46. — № 4. — С. 405–416. — DOI: 10.31857/S0321-0596464405-416.
4. OpenStreetMap: некоммерческий веб-картографический проект по созданию свободной географической информации. — URL: <https://www.openstreetmap.org/> (дата обращения: 29.05.2025).
5. Горбатовский В.В. Катунский заповедник / В.В. Горбатовский // *Большая российская энциклопедия*. — URL: <https://bigenc.ru/c/katunskii-zarovednik-3b41f1/> (дата публикации: 23.12.2024).
6. Десятова Д.С. Природные и антропогенные факторы, влияющие на экосистему Мультигинских озер / Д.С. Десятова, А.Т. Абрамян, Д.Д. Тарновецкий // *Международный научно-исследовательский журнал*. — 2024. — № 4 (142). — DOI: 10.23670/IRJ.2024.142.142.
7. Приказ об утверждении Положения и границ памятника природы республиканского значения «Мультигинские озера». — 2019. — № 595. — URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0401201907220001> (дата обращения: 29.05.2025).
8. U.S. Geological Survey. EarthExplorer. — URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed: 20.05.2025).
9. U.S. Geological Survey. Landsat Collection 2 Level 2 Science Products. — URL: https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/media/files/LSDS-1619_Landsat8-9-Collection2-Level2-Science-Product-Guide-v6.pdf (accessed: 20.05.2025).
10. U.S. Geological Survey. Landsat Normalized Difference Vegetation Index. — URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-normalized-difference-vegetation-index> (accessed: 20.05.2025).
11. Modified Normalized Difference Water Index. — URL: <https://farmonaut.com/remote-sensing/mastering-satellite-vegetation-indices-mndwi-msavi-and-ndmi-formulas-for-sentinel-2-imagery-in-precision-agriculture> (accessed: 20.05.2025).
12. U.S. Geological Survey. Normalized Difference Snow Index. — URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/normalized-difference-snow-index> (accessed: 20.05.2025).
13. Трапезникова К.И. Динамика водного зеркала и растительного покрова прибрежной зоны лимана Молочный в 2024 г / К.И. Трапезникова, И.В. Шевурдяев // *Экология. Экономика. Информатика*. Серия: геоинформационные технологии и космический мониторинг. — 2025. — Т. 2. — № 10. — С. 94–98. — DOI: 10.23885/2500-123X-2-10-94-98.
14. Булыгина О.Н. Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России / О.Н. Булыгина, В.Н. Разуваев, Л.Т. Трофименко [и др.]. — 2015. — URL: <http://meteo.ru/data/total-precipitation/> (дата обращения: 10.01.2026).
15. Google Earth. Мультигинские озера, 3D карта. — URL: <https://earth.google.com/web/search/мультигинские+озера> (дата обращения: 12.01.2026).
16. Schultz P.A. Global correlation of temperature, NDVI and precipitation / P.A. Schultz, M.S. Halpert // *Advances in Space Research*. — 1993. — Vol. 13. — № 5. — P. 277–280. — DOI: 10.1016/0273-1177(93)90559-T.
17. Гусев А.П. Изменения NDVI как индикатор динамики экологического состояния ландшафтов (на примере восточной части Полесской провинции) / А.П. Гусев // *Вестник ВГУ*. Серия: География. Геоэкология. — 2020. — № 1. — С. 101–107. — DOI: 10.17308/geo.2020.1/2667
18. Шарый П.А. Изменение NDVI лесных экосистем Северного Кавказа как функция рельефа и климата / П.А. Шарый, Л.С. Шарая // *Лесоведение*. — 2014. — № 5. — С. 83–90. — EDN: SQBXBZ.
19. Yue H. Analysis of Dynamic Change of Hongjiannao Lake Based on MNDWI / H. Yue, Y. Liu, H. Wang [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: Quicker, Better, Broader Understanding of One Belt and One Road*



(OBOR), Beijing, 16–17 May 2016. — Beijing, 2017. — P. 012005. — DOI: 10.1088/1755-1315/57/1/012005. — EDN: ZYZLSH.

20. Черных Д.В. Пространственно-временная динамика ландшафтов водосборных бассейнов Алтайского региона в последние 40 лет / Д.В. Черных, Р.Ю. Бирюков, Д.В. Золотов [и др.] // География и природные ресурсы. — 2018. — № 3. — С. 104–115. — DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-3(104-115). — EDN: XYUIDR.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Vtoroj otsenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii [Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Change and Its Consequences on the Territory of the Russian Federation] / Ed. by A.I. Bedritskiy. — Moscow: IGKE Rosgidromet and RAS, 2014. — 1009 p. [in Russian]

2. Narozhnyy Yu.K. Sovremennoe oledneniye Altaya na rubezhe XXI veka [Modern Glaciation of Altai at the Turn of the 21st Century] / Yu.K. Narozhnyy, S.A. Nikitin // Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy [Data of Glaciological Studies]. — 2003. — № 95. — P. 3–12. [in Russian]

3. Borodina E.V. Formirovanie khimicheskogo sostava ozernykh vod osobo okhranyaemykh territoriy Gornogo Altaya na primere basseyna r. Multy [Formation of the Chemical Composition of Lake Waters in Protected Areas of the Altai Mountains: the Multa River Basin] / E.V. Borodina, U.O. Borodina // Vodnye resursy [Water Resources]. — 2019. — Vol. 46. — № 4. — P. 405–416. — DOI: 10.31857/S0321-0596464405-416. [in Russian]

4. OpenStreetMap: nekommercheskiy veb-kartograficheskiy proekt po sozdaniyu svobodnoy geograficheskoy informatsii [OpenStreetMap: a Collaborative Project to Create Free Geographic Data]. — URL: <https://www.openstreetmap.org/> (accessed: 29.05.2025).

5. Gorbatovskiy V.V. Katunskiy zapovednik [Katun Nature Reserve] / V.V. Gorbatovskiy // Bol'shaya rossiyskaya entsiklopediya [Great Russian Encyclopedia]. — URL: <https://bigenc.ru/c/katunskii-zapovednik-3b41f1/> (published: 23.12.2024). [in Russian]

6. Desyatova D.S. Prirodnye i antropogennye faktory, vliyayushchie na ekosistemu Multinskikh ozer [Natural and Anthropogenic Factors Affecting the Ecosystem of the Multinsky Lakes] / D.S. Desyatova, A.T. Abramyan, D.D. Tarnovskiy // Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal [International Research Journal]. — 2024. — № 4 (142). — DOI: 10.23670/IRJ.2024.142.142. [in Russian]

7. Prikaz ob utverzhdenii Polozheniya i granits pamyatnika prirody respublikanskogo znacheniya «Multinskie ozera» [Order on Approval of the Regulation and Boundaries of the Nature Monument of Republican Significance “Multinsky Lakes”]. — 2019. — № 595. — URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0401201907220001> (accessed: 29.05.2025) [in Russian]

8. U.S. Geological Survey. EarthExplorer. — URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed: 20.05.2025).

9. U.S. Geological Survey. Landsat Collection 2 Level 2 Science Products. — URL: https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/media/files/LSDS-1619_Landsat8-9-Collection2-Level2-Science-Product-Guide-v6.pdf (accessed: 20.05.2025).

10. U.S. Geological Survey. Landsat Normalized Difference Vegetation Index. — URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-normalized-difference-vegetation-index> (accessed: 20.05.2025).

11. Modified Normalized Difference Water Index. — URL: <https://farmonaut.com/remote-sensing/mastering-satellite-vegetation-indices-mndwi-msavi-and-ndmi-formulas-for-sentinel-2-imagery-in-precision-agriculture> (accessed: 20.05.2025).

12. U.S. Geological Survey. Normalized Difference Snow Index. — URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/normalized-difference-snow-index> (accessed: 20.05.2025).

13. Trapeznikova K.I. Dinamika vodnogo zerkala i rastitel'nogo pokrova pribrezhnoy zony limana Molochnyy v 2024 g [Dynamics of the Water Surface and Vegetation Cover of the Molochnyy Liman Coastal Zone in 2024] / K.I. Trapeznikova, I.V. Sheverdyayev // Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Seriya: geoinformatsionnye tekhnologii i kosmicheskii monitoring [Ecology. Economy. Informatics. Series: Geoinformation Technologies and Space Monitoring]. — 2025. — Vol. 2. — № 10. — P. 94–98. — DOI: 10.23885/2500-123X-2-10-94-98. [in Russian]

14. Bulygina O.N. Opisanie massiva dannykh mesyachnykh summ osadkov na stantsiyakh Rossii [Description of the Dataset of Monthly Precipitation Totals at Russian Stations] / O.N. Bulygina, V.N. Razuvaev, L.T. Trofimenko [et al.]. — 2015. — URL: <http://meteo.ru/data/total-precipitation/> (accessed: 10.01.2026). [in Russian]

15. Google Earth. Multinskie ozera, 3D karta [Multinsky Lakes, 3D Map]. — URL: <https://earth.google.com/web/search/мультиинские+озера> (accessed: 12.01.2026).

16. Schultz P.A. Global correlation of temperature, NDVI and precipitation / P.A. Schultz, M.S. Halpert // Advances in Space Research. — 1993. — Vol. 13. — № 5. — P. 277–280. — DOI: 10.1016/0273-1177(93)90559-T.

17. Gusev A.P. Izmeneniya NDVI kak indikator dinamiki ekologicheskogo sostoyaniya landshaftov (na primere vostochnoy chasti Poleskoy provintsii) [NDVI Changes as an Indicator of the Dynamics of Ecological State of Landscapes (Case Study of the Eastern Part of the Polesie Province)] / A.P. Gusev // Vestnik VGU. Seriya: Geografiya. Geoekologiya [Bulletin of VSU. Series: Geography. Geoecology]. — 2020. — № 1. — P. 101–107. — DOI: 10.17308/geo.2020.1/2667. [in Russian]

18. Sharyy P.A. Izmenenie NDVI lesnykh ekosistem Severnogo Kavkaza kak funktsiya rel'efa i klimata [NDVI Changes in Forest Ecosystems of the North Caucasus as a Function of Relief and Climate] / P.A. Sharyy, L.S. Sharaya // Lesovedenie [Forestry]. — 2014. — № 5. — P. 83–90. — EDN: SQBXBZ. [in Russian]

19. Yue H. Analysis of Dynamic Change of Hongjiannao Lake Based on MNDWI / H. Yue, Y. Liu, H. Wang [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: Quicker, Better, Broader Understanding of One Belt and One Road



(OBOR), Beijing, 16–17 May 2016. — Beijing, 2017. — P. 012005. — DOI: 10.1088/1755-1315/57/1/012005. — EDN: YZYLSH.

20. Chernykh D.V. Prostranstvenno-vremennaya dinamika landshaftov vodosbornykh basseynov Altayskogo regiona v poslednie 40 let [Spatio-Temporal Dynamics of Landscapes of Drainage Basins in the Altai Region over the Past 40 Years] / D.V. Chernykh, R.Yu. Biryukov, D.V. Zolotov [et al.] // Geografiya i Prirodnye Resursy [Geography and Natural Resources]. — 2018. — № 3. — P. 104–115. — DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-3(104-115). — EDN: XYUIDR. [in Russian]