УДК 556.555 : 551.58 : 528.88 https://doi.org/10.5281/zenodo.20785128

Мягков С.С., Дергачева И.В.

Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Ташкент, Узбекистан

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ПЛОЩАДИ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОЗЕРА ДАУТКУЛЬ В ПРИАРАЛЬЕ ПО ДАННЫМ SENTINEL-2

Аннотация. *В статье рассмотрена внутригодовая динамика водной поверхности озера Даутkуль, расположенного в аридной зоне Приаралья. Исследование выполнено на основе мультиспектральных спутниковых данных Sentinel-2 за период с декабря 2024 г. по ноябрь 2025 г. Для выделения водной поверхности применён нормализованный водный индекс NDWI, позволяющий осуществлять автоматизированное дешифрирование водных объектов по данным дистанционного зондирования Земли. Выполнены векторизация водной поверхности и расчёт площади озера для каждого месяца исследуемого периода. Установлено, что площадь водного зеркала изменялась в диапазоне от 0,48 до 23,66 км², что свидетельствует о высокой сезонной изменчивости площади водной поверхности озера. Максимальные значения площади наблюдались в зимне-весенний период, минимальные — в конце летнего сезона. Полученные результаты позволяют предположить, что выявленная динамика связана с природными условиями аридной зоны и особенностями поступления коллекторно-дренажных вод. Полученные результаты подтверждают эффективность использования спутникового мониторинга для оценки сезонной динамики водной поверхности озёр аридных территорий.*

Ключевые слова: *озеро Даутkуль, Приаралье, аридные территории, Sentinel-2, дистанционное зондирование Земли, NDWI, сезонная динамика водной поверхности.*

Myagkov S.S., Dergacheva I.V.

Hydrometeorological Research Institute, Tashkent, Uzbekistan

SEASONAL DYNAMICS OF THE WATER SURFACE AREA OF DAUTKUL LAKE IN THE ARAL SEA REGION BASED ON SENTINEL-2 DATA

Abstract. *The article examines the intra-annual dynamics of the water surface area of Lake Dautkul, located in the arid zone of the Aral Sea region. The study was carried out using multispectral Sentinel-2 satellite data for the period from December 2024 to November 2025. The Normalized Difference Water Index (NDWI) was applied to delineate the water surface, enabling automated identification of water bodies based on remote sensing data. Vectorization of the water surface and calculation of the lake area were performed for each month of the study period. It was established that the water surface area varied from 0.48 to 23.66 km², indicating high seasonal variability of the lake's water surface area. The maximum area values were observed during the winter–spring period, while the minimum values occurred at the end of the summer season. The obtained results suggest that the identified dynamics are associated with the natural conditions of the arid zone and the characteristics of collector-drainage water inflow. The results confirm the effectiveness of satellite monitoring for assessing the seasonal dynamics of lake water surfaces in arid territories.*

Key words: *Dautkul Lake, Aral Sea region, arid territories, Sentinel-2, remote sensing, NDWI, seasonal water dynamics.*

Введение и постановка проблемы. В условиях современного изменения климата и возрастающего дефицита водных ресурсов особую актуальность приобретает исследование сезонной динамики и пространственно-временной изменчивости озёр аридных территорий. Для водоёмов Центральной Азии характерны высокая сезонная изменчивость площади водной поверхности и значительная зависимость от климатических и антропогенных факторов. Особенно остро данные процессы

проявляются в пределах Приаралья, где в результате трансформации речного стока и интенсивного водохозяйственного освоения произошли существенные изменения структуры водных объектов территории [1, 4, 18].

Озёрные системы Приаралья представляют собой важный элемент природно-хозяйственной структуры региона и выполняют значимые экологические функции. Они участвуют в перераспределении поверхностного стока, оказывают влияние на локальные микроклиматические условия, являются местами концентрации биологических ресурсов и одновременно выступают индикаторами изменения природно-хозяйственной обстановки. В условиях аридного климата даже незначительные изменения водопритока и испаряемости способны вызывать резкие колебания площади водной поверхности [3, 7, 9].

Для большинства озёр дельтовых и коллекторно-дренажных систем характерен неустойчивый режим изменчивости площади, определяемый сочетанием природных и антропогенных процессов. К числу ключевых факторов относятся:

- высокая интенсивность испарения;
- сезонная изменчивость температурного режима;
- нерегулярность поступления коллекторно-дренажных вод;
- особенности водохозяйственного регулирования;
- изменение режима водопользования в вегетационный и межвегетационный периоды.

Одним из типичных водоёмов подобного типа является озеро Дауткуль, расположенное в пределах Приаралья. Формирование и существование данного озера в значительной степени связано с перераспределением дренажного стока и функционированием коллекторно-дренажной сети. Вследствие этого площадь водной поверхности озера характеризуется выраженной сезонной изменчивостью и высокой чувствительностью к изменениям водообеспечения территории.

Традиционные гидрологические наблюдения, основанные на стационарных измерениях, в условиях труднодоступности и пространственной неоднородности дельтовых территорий не всегда обеспечивают получение оперативной и детализированной информации о состоянии водоёмов. В этой связи методы дистанционного зондирования Земли становятся одним из наиболее эффективных инструментов мониторинга водных объектов [5, 6].

Современные спутниковые системы, в частности миссия Sentinel-2 программы Copernicus, обеспечивают получение мультиспектральных данных высокого пространственного и временного разрешения, что позволяет проводить регулярный мониторинг сезонной динамики водной поверхности [11]. Использование спектральных индексов позволяет автоматизировать оценку морфометрических характеристик озёр и анализ сезонной изменчивости их площади. [12, 13, 17, 22].

Несмотря на значительное количество исследований, посвящённых мониторингу водных объектов по спутниковым данным, вопросы внутригодовой динамики озёр аридной зоны Приаралья остаются недостаточно изученными. Особенно ограничены исследования, ориентированные на количественный анализ сезонной трансформации малых и средних озёр коллекторно-дренажных систем.

В связи с этим исследование сезонной динамики площади водной поверхности озера Дауткуль на основе спутникового мониторинга представляет научный и практический интерес для оценки состояния водных ресурсов аридных территорий и совершенствования методов дистанционного мониторинга водных объектов [2, 8].

Изученность вопроса. Исследования сезонной динамики и пространственно-временной изменчивости озёр аридных территорий Центральной Азии в последние десятилетия приобрели особую актуальность в связи с деградацией водных экосистем Приаралья и изменением регионального водного баланса [1, 2, 4, 18]. Значительное внимание в научной литературе уделяется вопросам трансформации озёрных систем под воздействием климатических изменений и антропогенного регулирования стока.

Одним из ключевых направлений современных исследований является применение методов дистанционного зондирования Земли для мониторинга поверхностных вод [3, 6]. Использование спутниковых данных позволяет получать регулярную и пространственно детализированную информацию о динамике водных объектов, что особенно важно для труднодоступных территорий и регионов с ограниченной сетью гидрологических наблюдений. В последние годы широкое развитие получили облачные платформы обработки спутниковых данных, включая Google Earth Engine, обеспечивающие автоматизированный анализ многовременных рядов Sentinel-2 [15].

Для выделения водной поверхности широко применяются спектральные индексы, основанные на различиях отражательной способности воды в видимом и инфракрасном диапазонах спектра. Наиболее распространённым является нормализованный водный индекс NDWI, предложенный S. McFeeters [17]. Данный индекс получил широкое распространение благодаря простоте расчёта и высокой эффективности при идентификации открытой водной поверхности.

В дальнейшем методика была усовершенствована рядом исследователей. H. Xu предложил модифицированный индекс MNDWI, обеспечивающий более устойчивое выделение водных объектов в условиях сложного фонового покрытия [22]. Исследования Ji et al. показали необходимость адаптации пороговых значений индексов в зависимости от природных условий исследуемой территории [14].

С развитием спутниковых систем высокого разрешения значительно расширились возможности дистанционного мониторинга водных объектов. Особое значение имеют данные миссии Sentinel-2, обеспечивающие сочетание высокой пространственной детализации и регулярности наблюдений [11, 12]. Использование многовременных рядов Sentinel-1/2 и облачных платформ обработки данных, включая Google Earth Engine, позволяет эффективно выполнять автоматизированное картографирование и мониторинг водно-болотных угодий и озёрных систем [19]. Применение данных Sentinel-2 создаёт возможность детального анализа сезонной динамики водоёмов, изменения береговой линии и внутригодовой изменчивости площади водной поверхности.

Для территорий Приаралья исследования с применением спутниковых данных в основном посвящены крупным водным объектам, изменениям водной поверхности Аральского моря и трансформации водно-болотных угодий дельтовых территорий [5, 7, 20]. При этом значительно меньше внимания уделяется озёрам коллекторно-дренажного происхождения, характеризующимся высокой сезонной изменчивостью и существенной зависимостью от водохозяйственного регулирования.

Ряд исследований показывает, что водоёмы аридной зоны отличаются повышенной чувствительностью к изменениям испаряемости и режиму водопритока [3, 9, 13]. В условиях высоких летних температур даже кратковременное сокращение поступления воды способно приводить к быстрому уменьшению площади водной поверхности и фрагментации озёр.

Несмотря на активное развитие методов дистанционного мониторинга, вопросы внутригодовой динамики площади водной поверхности озёр Приаралья остаются недостаточно изученными. Особенно ограничены исследования, основанные на систематическом анализе временных рядов спутниковых данных с оценкой сезонных фаз изменения площади водной поверхности. При этом специализированные исследования внутригодовой динамики площади водной поверхности озера Дауткуль на основе многовременных спутниковых данных Sentinel-2 в доступной научной литературе представлены ограниченно.

В связи с этим применение спутникового мониторинга для исследования сезонной динамики озера Дауткуль представляет собой актуальное направление геоинформационных и дистанционных исследований водных объектов аридной зоны, ориентированное на количественную оценку сезонной изменчивости площади водной поверхности [6, 16, 21].

Цель и задачи работы. Целью исследования является оценка сезонной изменчивости площади водной поверхности озера Дауткуль в условиях аридной зоны Приаралья на основе мультиспектральных спутниковых данных Sentinel-2 и индекса NDWI.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Реализовано автоматизированное выделение водной поверхности озера с использованием нормализованного водного индекса NDWI.
2. Выполнены векторизация водной поверхности и расчёт площади озера для каждого этапа наблюдений.
3. Проанализирована сезонная изменчивость площади водной поверхности озера и выделены основные фазы её изменения.
4. Выполнена интерпретация выявленной сезонной динамики площади водной поверхности озера Дауткуль.

Материалы и методы. Объектом исследования является озеро Дауткуль, расположенное в пределах Приаралья на территории Республики Узбекистан. Озеро относится к числу водоёмов аридной зоны, режим изменчивости площади которых формируется под воздействием как природных, так и антропогенных факторов.

Озеро Дауткуль расположено в северо-западной части Республики Узбекистан, в пределах дельтовой равнины Амударьи на территории Республики Каракалпакстан. Центральная часть исследуемого водоёма расположена в 42°51′59″ с.ш. и 59°18′40″ в.д. Географическое положение района исследования представлено на рис. 1.

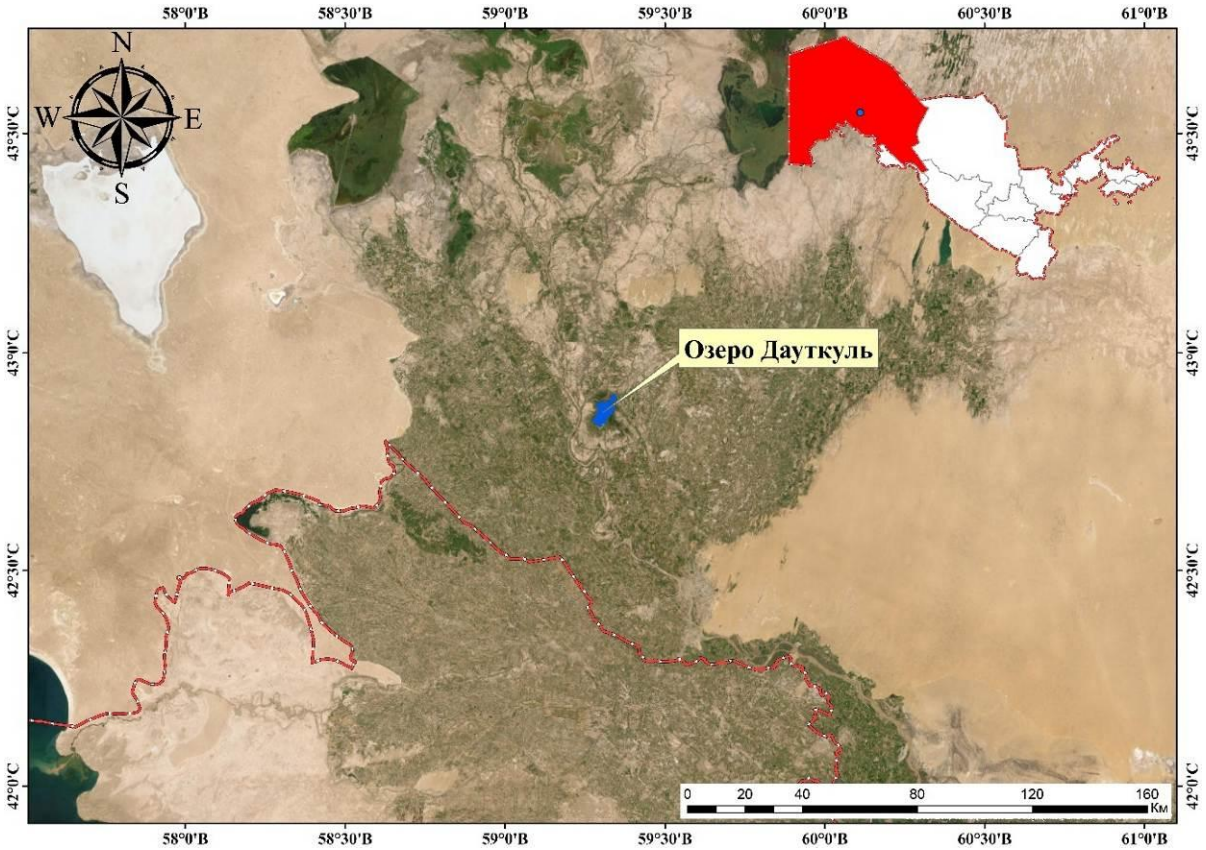


Рис. 1. Географическое положение озера Дауткуль в пределах Приаралья

Водоём относится к озёрам коллекторно-дренажного происхождения, формирующимся под влиянием ирригационного водопользования и перераспределения дренажного стока. Питание озера осуществляется преимущественно за счёт коллекторно-дренажных вод, поступающих из оросительных систем Приаралья. Для озера характерны высокая минерализация и значительная сезонная изменчивость площади водной поверхности.

Особенностью исследуемого водоёма является его зависимость от поступления коллекторно-дренажных вод и перераспределения стока в условиях развитого ирригационного земледелия.

В условиях аридного климата Приаралья сочетание высоких летних температур и ограниченного водопритока обусловливает значительную сезонную изменчивость площади водной поверхности, что делает озеро Дауткуль репрезентативным объектом для исследования динамики озёр аридной зоны.

В качестве исходных материалов использовались мультиспектральные спутниковые изображения Sentinel-2 программы Copernicus [11]. Данные получены с сенсора MSI (Multispectral Instrument), обеспечивающего съёмку земной поверхности в 13 спектральных диапазонах с пространственным разрешением 10, 20 и 60 м.

Для исследования применялись спутниковые продукты уровня обработки Level-2A (L2A), содержащие значения отражательной способности земной поверхности, скорректированные с учётом атмосферного влияния. Использование данных данного уровня обеспечивает сопоставимость результатов при многовременном анализе и позволяет минимизировать влияние атмосферных искажений.

Для выделения водной поверхности использовались спектральные каналы B3 (Green, 0,560 мкм, пространственное разрешение 10 м) и B8 (NIR, 0,842 мкм, пространственное разрешение 10 м).

Выбор данных каналов обусловлен спектральными особенностями воды, характеризующейся повышенным поглощением излучения в ближнем инфракрасном диапазоне и более высокой отражательной способностью в зелёной области спектра [17, 22].

Для анализа внутригодовой динамики был сформирован временной ряд, включающий 12 спутниковых сцен за период с декабря 2024 г. по ноябрь 2025 г. Информация о датах спутниковых съёмок и показателях облачности использованных сцен Sentinel-2 приведена в таблице 1.

Таблица 1

Основные характеристики спутниковых сцен Sentinel-2, использованных для анализа сезонной динамики озера Дауткуль

Месяц	Дата съёмки	Облачность сцены, %	Месяц	Дата съёмки	Облачность сцены, %
Декабрь	26.12.2024	0.037468	Июнь	29.06.2025	0.000903
Январь	10.01.2025	5.142473	Июль	19.07.2025	0.028659
Февраль	09.02.2025	0.52675	Август	28.08.2025	0.000053
Март	11.03.2025	6.219403	Сентябрь	27.09.2025	0.001815
Апрель	07.04.2025	0.005827	Октябрь	24.10.2025	0.011196
Май	30.05.2025	0.00117	Ноябрь	26.11.2025	0.021766

Таблица составлена авторами.

Отбор изображений выполнялся по следующим критериям:

- минимальная облачность;
- отсутствие выраженных атмосферных искажений;
- репрезентативность сцены для соответствующего месяца;
- сопоставимость условий съёмки.

Период повторного покрытия территории спутниками Sentinel-2A и Sentinel-2B составляет около 5 суток, что обеспечивает возможность регулярного мониторинга динамики водных объектов.

Предварительная обработка данных включала визуальный контроль качества спутниковых сцен, проверку пространственной привязки и формирование единого временного ряда данных. Поскольку используемые спектральные каналы имеют

одинаковое пространственное разрешение 10 м, дополнительная процедура приведения пространственного разрешения не требовалась.

Для автоматизированного выделения водной поверхности использовался нормализованный водный индекс NDWI, основанный на различии отражательной способности воды в зелёном и ближнем инфракрасном диапазонах [17].

$$NDWI = \frac{B3 - B8}{B3 + B8} \quad (1)$$

где: B3 — отражательная способность в зелёном диапазоне, B8 — отражательная способность в ближнем инфракрасном диапазоне.

Физическая основа метода заключается в том, что вода интенсивно поглощает электромагнитное излучение в ближнем инфракрасном диапазоне, вследствие чего значения индекса для водной поверхности принимают положительные значения, тогда как для суши характерны отрицательные значения NDWI.

Для классификации водной поверхности применялась пороговая бинаризация [13]:

- NDWI > 0 — водная поверхность;
- NDWI ≤ 0 — прочие объекты.

Пороговое значение NDWI > 0 выбрано на основе рекомендаций McFeeters [17] и дополнительно проверено визуальным сопоставлением результатов классификации с исходными спутниковыми изображениями Sentinel-2 для территории исследования.

После бинарной классификации выполнялась постобработка результатов, включавшая:

- удаление одиночных пикселей;
- фильтрацию мелких изолированных объектов;
- устранение шумов классификации;
- корректировку границ водной поверхности.

Контроль корректности выделения водной поверхности выполнялся путём визуального сопоставления результатов классификации NDWI с синтезированными спутниковыми изображениями Sentinel-2 в естественных цветах. Дополнительно проверялась согласованность конфигурации береговой линии между соседними временными сценами.

Дополнительно выполнялась визуальная оценка корректности классификации водной поверхности путём сопоставления результатов бинаризации NDWI с исходными мультиспектральными изображениями Sentinel-2 в естественных цветах. Проверка показала высокую согласованность выделенных контуров водной поверхности с фактическими границами озера на спутниковых сценах исследуемого периода.

Полученные бинарные растры преобразовывались в векторный формат, после чего выполнялся расчёт площади водной поверхности озера. Площадные характеристики определялись в метрической проекции, обеспечивающей корректность пространственных измерений.

Для каждого месяца исследуемого периода были получены значения площади водного зеркала, на основе которых сформирован временной ряд внутригодовой динамики озера Дауткуль.

При интерпретации результатов учитывались ограничения, характерные для дистанционного мониторинга водных объектов аридных территорий [8, 11, 12]. Основными факторами, влияющими на точность выделения водной поверхности, являются:

- наличие влажных почв;
- засолённые поверхности;
- прибрежная растительность;
- высокая мутность воды;
- влияние атмосферных условий.

Несмотря на указанные ограничения, использование данных Sentinel-2 и индексного подхода NDWI обеспечивает достаточную точность оценки сезонной динамики площади водной поверхности и позволяет эффективно анализировать гидрологическое состояние озёр аридной зоны.

Результаты и их обсуждение. В результате обработки мультиспектральных спутниковых изображений Sentinel-2 был сформирован временной ряд, характеризующий внутригодовую динамику площади водной поверхности озера Дауткуль за период с декабря 2024 г. по ноябрь 2025 г.

На основе расчёта индекса NDWI выполнено автоматизированное выделение водной поверхности озера для каждого месяца исследуемого периода. Подобный подход широко применяется в современных исследованиях автоматизированного картографирования и многовременного мониторинга озёрных систем по спутниковым данным [23]. Полученные результаты позволили определить пространственные границы водоёма и выполнить количественную оценку изменений площади водного зеркала. Пространственные изменения площади и конфигурации водной поверхности озера в течение исследуемого периода представлены на рис. 2. Результаты расчёта площади водной поверхности представлены в таблице 2.

Таблица 2

Внутригодовая динамика площади водной поверхности озера Дауткуль

Месяц	Площадь, км²	Месяц	Площадь, км²
Декабрь	16,66	Июнь	11,59
Январь	20,22	Июль	11,38
Февраль	23,66	Август	2,37
Март	23,51	Сентябрь	0,48
Апрель	21,99	Октябрь	5,98
Май	18,25	Ноябрь	18,57

Таблица составлена авторами.

В зимне-весенний период (декабрь – апрель) наблюдаются наиболее высокие значения площади водной поверхности. В данный период площадь озера изменялась в пределах от 16,66 до 23,66 км². Формирование максимальной площади водной поверхности в конце зимы и начале весны может быть связано сочетанием нескольких факторов:

- снижением интенсивности испарения при низких температурах воздуха;
- возможным увеличением поступления коллекторно-дренажных вод;
- аккумуляцией водных масс в межвегетационный период;
- уменьшением водозабора на хозяйственные нужды.

Наибольшая площадь озера отмечена в феврале–марте, что свидетельствует о преобладании процессов накопления воды над потерями на испарение [3, 9].

Начиная с мая наблюдается устойчивая тенденция сокращения площади водной поверхности. В летний период наблюдается интенсивное сокращение площади озера. Площадь водного зеркала уменьшается с 18,25 км² в мае до 11,38 км² в июле.

Данная динамика обусловлена:

- резким увеличением испаряемости;
- высокими температурами воздуха;
- усилением дефицита влаги;
- сокращением поступления воды в озеро;
- активным водопотреблением в период вегетации.

Особенно интенсивное уменьшение площади фиксируется в августе и сентябре. В августе площадь водной поверхности составила 2,37 км², а в сентябре сократилась до минимального значения — 0,48 км². Критическое уменьшение площади озера в конце летнего периода свидетельствует о высокой зависимости водоёма от внешнего водопритока.

В условиях аридного климата даже кратковременное сокращение поступления воды приводит к резкому уменьшению акватории.

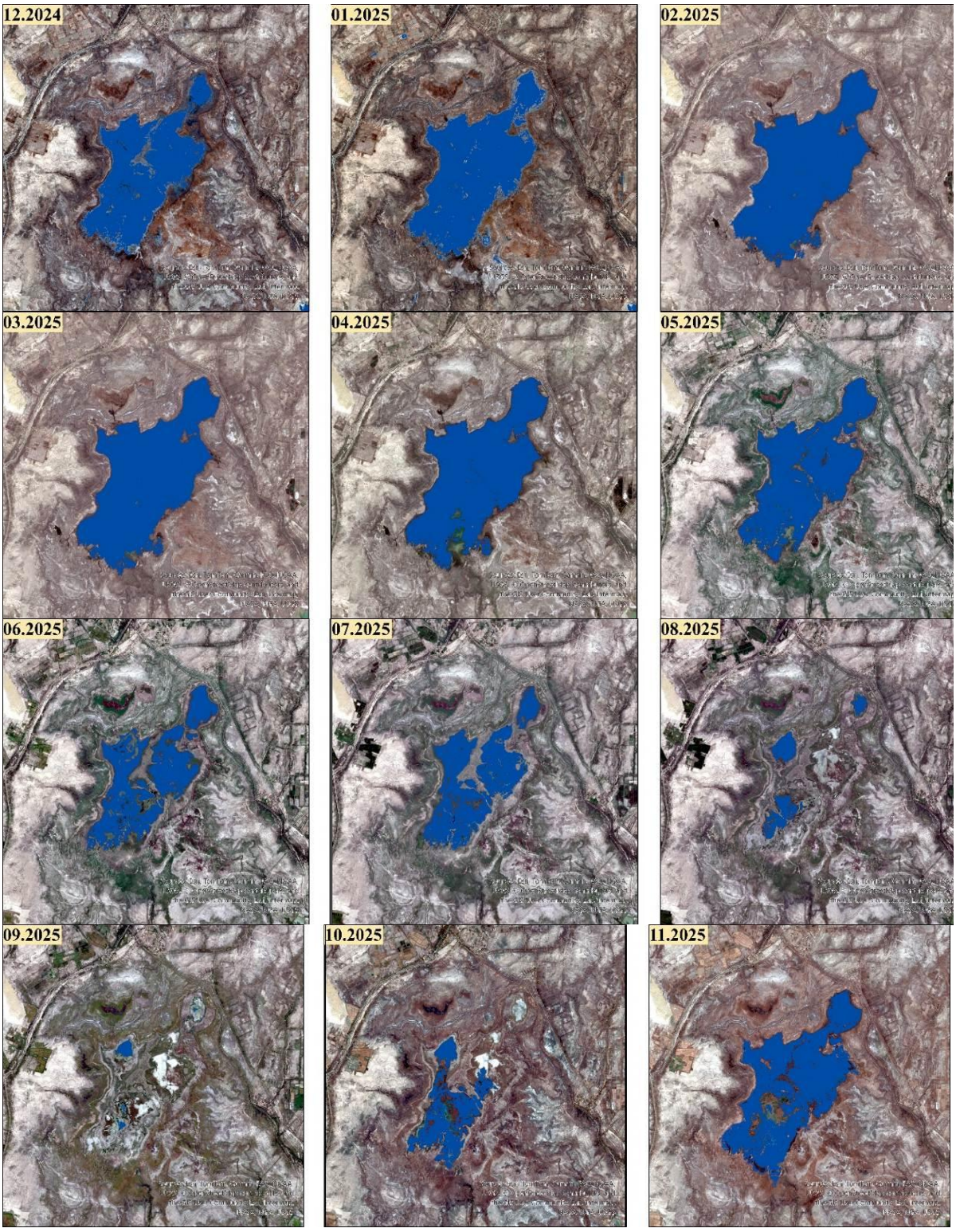


Рис. 2. Сезонная динамика водной поверхности озера Дауткуль по данным спутникового мониторинга Sentinel-2 (декабрь 2024 г. – ноябрь 2025 г.)

Полученные результаты позволяют предположить, что в данный период происходила частичная фрагментация водоёма с образованием отдельных изолированных участков водной поверхности, что типично для озёр коллекторно-дренажного происхождения [4, 8].

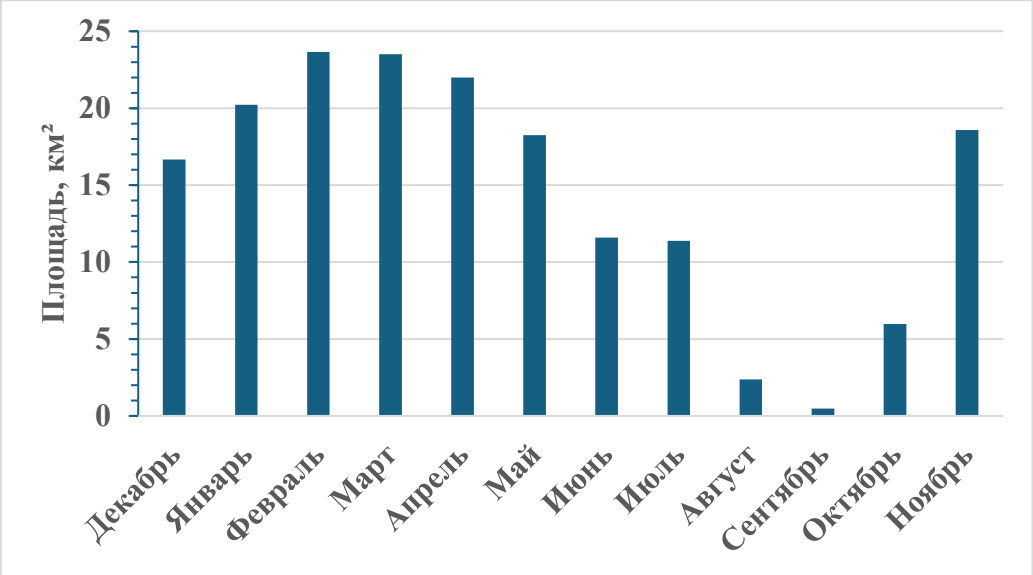


Рис. 3. Внутригодовая динамика площади водной поверхности озера Дауткуль в 2024–2025 гг.

Рисунок составлен автором.

В осенний период наблюдается повторное увеличение площади озера. В октябре площадь составила 5,98 км², а в ноябре увеличилась до 18,57 км².

Повторное увеличение площади водной поверхности озера может быть связано со следующими факторами:

- уменьшением интенсивности испарения;
- сезонным изменением режима водопользования;
- увеличением объёмов коллекторно-дренажного стока;
- особенностями водохозяйственного регулирования территории.

Резкий рост площади в ноябре указывает на существенное увеличение поступления воды в озеро. Подобная динамика характерна для водоёмов, режим изменчивости площади которых определяется не только природными процессами, но и антропогенным регулированием водного стока [4, 7].

Полученные результаты позволяют предположить, что существенное влияние на сезонную динамику площади озера оказывают климатические условия аридной зоны и особенности водохозяйственного функционирования территории.

В условиях аридного климата Приаралья сезонная изменчивость площади водной поверхности озёр тесно связана с природными условиями территории и особенностями водообеспечения [3, 9, 13]. В тёплый период года интенсивность испарения существенно возрастает, что приводит к ускоренному сокращению площади водной поверхности при отсутствии стабильного притока воды.

Одновременно значительное влияние оказывает антропогенный фактор. Озеро Дауткуль связано с системой коллекторно-дренажных вод, вследствие чего его режим изменчивости площади зависит от:

- режима ирригационного водопользования;
- перераспределения стока;
- сезонных водохозяйственных сбросов;
- функционирования дренажной сети.

Проведённое исследование показало высокую эффективность использования спутниковых данных Sentinel-2 для мониторинга сезонной динамики водной поверхности озёр аридной зоны [11, 12, 21].

Применение индексного метода NDWI обеспечило:

- устойчивое выделение водной поверхности;
- возможность автоматизированной обработки данных;
- получение сопоставимых результатов для многовременного анализа;
- количественную оценку сезонной динамики водного зеркала.

Использование данных Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м позволило детально отобразить изменения береговой линии и оценить динамику площади водной поверхности даже при значительном сокращении акватории [10].

Вместе с тем необходимо учитывать ограничения метода. Потенциальные ошибки классификации могут возникать [8, 14]:

- в зонах влажных почв;
- на засолённых поверхностях;
- в участках с разреженной растительностью;
- при высокой мутности воды.

Несмотря на указанные ограничения, полученные результаты хорошо согласуются с ожидаемыми закономерностями сезонной динамики озёр аридной зоны и подтверждают возможность эффективного применения спутникового мониторинга для оценки сезонной динамики водных объектов Приаралья.

Выводы. На основе мультиспектральных спутниковых данных Sentinel-2 и нормализованного водного индекса NDWI выполнено автоматизированное выделение водной поверхности озера Дауткуль и сформирован временной ряд сезонной динамики площади водного зеркала за период с декабря 2024 г. по ноябрь 2025 г.

Установлено, что площадь водной поверхности озера Дауткуль характеризуется высокой сезонной изменчивостью. В течение исследуемого периода площадь озера изменялась в диапазоне от 0,48 до 23,66 км², а амплитуда внутригодовых колебаний составила 23,18 км².

Выявлена выраженная сезонная закономерность изменения площади водной поверхности озера. Максимальные значения площади наблюдались в зимне-весенний период — в феврале (23,66 км²) и марте (23,51 км²), тогда как минимальные значения были зафиксированы в конце летнего периода — в августе (2,37 км²) и сентябре (0,48 км²).

Анализ многовременных спутниковых изображений показал, что в летне-осенний период происходит значительное сокращение площади водной поверхности и изменение конфигурации акватории озера, включая частичную фрагментацию отдельных участков водоёма.

Полученные результаты позволяют предположить, что выявленная сезонная динамика озера Дауткуль связана с сочетанием природных условий аридной зоны и особенностями поступления коллекторно-дренажных вод. При этом для количественной оценки влияния климатических и водохозяйственных факторов необходимы дополнительные гидрометеорологические наблюдения и данные о водохозяйственном регулировании.

Разработанный подход может быть использован для мониторинга озёрных систем Приаралья, оценки пространственно-временной изменчивости водной поверхности и информационной поддержки исследований водных объектов аридной зоны.

Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность применения спутниковых данных Sentinel-2 и индексного подхода NDWI для мониторинга внутригодовой динамики озёр. Выявленные особенности сезонной изменчивости площади водной поверхности озера Дауткуль отражают высокую зависимость водоёма от режима поступления коллекторно-дренажных вод и климатических условий региона. Разработанный подход может быть использован для автоматизированного мониторинга состояния озёрных систем Приаралья, оценки изменений водных ресурсов и поддержки гидролого-экологических исследований аридных территорий.

Использованная литература:

1. Алибеков Л.А., Федорко В.Н. Аральский экологический кризис: предпосылки, последствия, перспективы // Известия Географического общества Узбекистана. 2020. Т. 57. С. 29-37.

2. Бортник В.Н., Чуб В.Е. Современные гидрологические проблемы Приаралья // Вестник НУУз. Серия географических наук. 2018. № 3. С. 41-48.

3. Гельдиева Г.В. Изменение гидрологического режима водоёмов аридной зоны Центральной Азии // Проблемы освоения пустынь. 2019. № 2. С. 15-23.

4. Духовный В.А., Соколов В.И. Интегрированное управление водными ресурсами в бассейне Аральского моря. Ташкент: НИЦ МКВК, 2003. 210 с.

5. Каюмов А.А., Турсунов Э.Т. Мониторинг водных объектов Приаралья по спутниковым данным // Геодезия и картография. 2021. № 5. С. 32-39.

6. Николаенко М.А., Романов А.А. Применение данных Sentinel-2 для мониторинга озёрных систем аридных территорий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 118-129.

7. Саидов А.Х., Юлдашев И.Х. Влияние климатических факторов на динамику водных ресурсов Приаралья // Метеорология и гидрология. 2017. № 9. С. 77-84.

8. Федорко В.Н. Территориальные природно-хозяйственные системы устьев крупных рек мира. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2016. 112 с.

9. Чуб В.Е. Изменение климата и его влияние на гидрологические процессы в Узбекистане. Ташкент: SANIGMI, 2007. 133 с.

10. Ayalke Z.G., Şişman A. (2024), Mapping Wetlands Using Sentinel-2 Satellite Imagery and Auxiliary Data with Google Earth Engine, *Advanced Engineering Days*, Vol. 9, pp. 975–978.

11. Drusch M., Del Bello U., Carlier S. et al. (2012), Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 120, pp. 25-36.

12. Du Y., Zhang Y., Ling F., Wang Q., Li W., Li X. (2016), Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index, *Remote Sensing*, Vol. 8, No. 4, pp. 354.

13. Feyisa G.L., Meilby H., Fensholt R., Proud S.R. (2014), Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 140, pp. 23-35.

14. Ji L., Zhang L., Wylie B. (2009), Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 75, No. 11, pp. 1307-1317.

15. Kwong I.H.Y., Wong F.K.K., Fung T. (2022), Automatic Mapping and Monitoring of Marine Water Quality Parameters Using Sentinel-2 Image Time-Series and Google Earth Engine Cloud Computing, *Frontiers in Marine Science*, Vol. 9, Article 871470.

16. Lehner B., Döll P. (2004), Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands, *Journal of Hydrology*, Vol. 296, No. 1-4, pp. 1-22.

17. McFeeters S.K. (1996), The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 17, No. 7, pp. 1425-1432.

18. Micklin P. (2007), The Aral Sea disaster, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 35, pp. 47-72.

19. Mohseni F., Ticehurst C., Phinn S. (2023), Wetland Mapping in Great Lakes Using Sentinel-1/2 Time-Series Data on the Google Earth Engine Platform, *Remote Sensing*, Vol. 15, No. 9, pp. 1–24.

20. Monitoring of Changes in the Water Surface and Wetland Area of the Aral Sea and the Aral Region (2025), *SIC ICWC Information System on Water and Land Resources in the Aral Sea Basin*. Available at: https://www.cawater-info.net/aral/data/monitoring_amu_e.htm (accessed: 04.06.2026).

21. Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S. (2016), High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes, *Nature*, Vol. 540, pp. 418-422.

22. Xu H. (2006), Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 27, No. 14, pp. 3025-3033.

23. Zhou T., Zhang Y., Li X. (2025), A Novel Framework for Accurate, Automated and Dynamic Lake Mapping Using Optical Satellite Imagery, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 221, pp. 102–118.

References:

1. Alibekov L.A., Fedorko V.N. (2020), Aral ecological crisis: prerequisites, consequences, prospects, *The Annales of the Geographical Society of Uzbekistan*, Vol. 57, pp. 29-37. (In Russ.).

2. Bortnik V.N., Chub V.E. (2018), Modern hydrological problems of the Aral Sea region, *Bulletin of the National University of Uzbekistan. Series of Geographical Sciences*, No. 3, pp. 41-48. (In Russ.).

3. Geldiyeva G.V. (2019), Changes in the hydrological regime of water bodies in the arid zone of Central Asia, Problems of Desert Development, No. 2, pp. 15-23. (In Russ.).

4. Dukhovny V.A., Sokolov V.I. (2003), *Integrated Water Resources Management in the Aral Sea Basin*, Tashkent, 210 p. (In Russ.).

5. Kayumov A.A., Tursunov E.T. (2021), Monitoring of water bodies in the Aral Sea region using satellite data, *Geodesy and Cartography*, No. 5, pp. 32-39. (In Russ.).

6. Nikolaenko M.A., Romanov A.A. (2022), Application of Sentinel-2 data for monitoring lake systems in arid territories, *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, Vol. 19, No. 4, pp. 118-129. (In Russ.).

7. Saidov A.Kh., Yuldashev I.Kh. (2017), Influence of climatic factors on the dynamics of water resources in the Aral Sea region, *Meteorology and Hydrology*, No. 9, pp. 77–84. (In Russ.).

8. Fedorko V.N. (2016), *Territorial Natural-Economic Systems of the Mouths of Large Rivers of the World*, Rostov-on-Don, 112 p. (In Russ.).

9. Chub V.E. (2007), *Climate Change and Its Influence on Hydrological Processes in Uzbekistan*, Tashkent, 133 p. (In Russ.).

10. Ayalke Z.G., Şişman A. (2024), Mapping Wetlands Using Sentinel-2 Satellite Imagery and Auxiliary Data with Google Earth Engine, *Advanced Engineering Days*, Vol. 9, pp. 975–978.

11. Drusch M., Del Bello U., Carlier S. et al. (2012), Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 120, pp. 25-36.

12. Du Y., Zhang Y., Ling F., Wang Q., Li W., Li X. (2016), Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index, *Remote Sensing*, Vol. 8, No. 4, pp. 354.

13. Feyisa G.L., Meilby H., Fensholt R., Proud S.R. (2014), Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 140, pp. 23-35.

14. Ji L., Zhang L., Wylie B. (2009), Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 75, No. 11, pp. 1307-1317.

15. Kwong I.H.Y., Wong F.K.K., Fung T. (2022), Automatic Mapping and Monitoring of Marine Water Quality Parameters Using Sentinel-2 Image Time-Series and Google Earth Engine Cloud Computing, *Frontiers in Marine Science*, Vol. 9, Article 871470.

16. Lehner B., Döll P. (2004), Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands, *Journal of Hydrology*, Vol. 296, No. 1-4, pp. 1-22.

17. McFeeters S.K. (1996), The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 17, No. 7, pp. 1425-1432.

18. Micklin P. (2007), The Aral Sea disaster, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 35, pp. 47-72.

19. Mohseni F., Ticehurst C., Phinn S. (2023), Wetland Mapping in Great Lakes Using Sentinel-1/2 Time-Series Data on the Google Earth Engine Platform, *Remote Sensing*, Vol. 15, No. 9, pp. 1–24.

20. Monitoring of Changes in the Water Surface and Wetland Area of the Aral Sea and the Aral Region (2025), *SIC ICWC Information System on Water and Land Resources in the Aral Sea Basin*. Available at: https://www.cawater-info.net/aral/data/monitoring_amu_e.htm (accessed: 04.06.2026).

21. Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S. (2016), High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes, *Nature*, Vol. 540, pp. 418-422.

22. Xu H. (2006), Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 27, No. 14, pp. 3025-3033.

23. Zhou T., Zhang Y., Li X. (2025), A Novel Framework for Accurate, Automated and Dynamic Lake Mapping Using Optical Satellite Imagery, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 221, pp. 102–118.

Сведения об авторах:

Мягков Сергей Сергеевич – Научно-исследовательский гидрометеорологический институт (Ташкент, Узбекистан), доктор философии (PhD) по географическим наукам, старший научный сотрудник. E-mail: s.s.myagkov@gmail.com

Дергачева Ирина Викторовна – Научно-исследовательский гидрометеорологический институт (Ташкент, Узбекистан), доктор географических наук (DSc). E-mail: dergacheva_iv@mail.ru

Information about authors:

Sergey Myagkov – Hydrometeorological Research Institute (Tashkent, Uzbekistan), PhD in Geographical Sciences, Senior Researcher. E-mail: s.s.myagkov@gmail.com

Irina Dergacheva – Hydrometeorological Research Institute (Tashkent, Uzbekistan), Doctor in Geographical Sciences (DSc). E-mail: dergacheva_iv@mail.ru

Для цитирования:

Мягков С.С., Дергачева И.В. Сезонная динамика площади водной поверхности озера Дауткуль в Приаралье по данным Sentinel-2 // Центральноазиатский журнал географических исследований. 2026. № 1-2. С. 130-142.

For citation:

Myagkov S.S., Dergacheva I.V. (2026), Seasonal dynamics of the water surface area of Dautkul lake in the Aral Sea region based on Sentinel-2 data, *Central Asian Journal of Geographical Sciences*, No. 1-2, pp. 130-142. (In Russ.).