

УДК 528.88

МОНИТОРИНГ СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПЛОЩАДИ ВОДОЁМА НА ОСНОВЕ SENTINEL-2 И GOOGLE EARTH ENGINE

Фаттаева Д.А.¹

¹ Самаркандский филиал Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий, Самарканд, Узбекистан

fattaeva19821712@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается мониторинг сезонных изменений площади водоёма по данным Sentinel-2 с использованием платформы Google Earth Engine и водного индекса NDWI на основе временного ряда за 2024, 2025 и первые три месяца 2026 года. Выполнен сравнительный анализ внутригодовой и межгодовой динамики водной поверхности, что позволило выявить сезонные закономерности изменения площади водоёма и оценить различия между исследуемыми периодами. Научная новизна работы заключается в комплексном применении автоматизированной обработки спутниковых данных, расчёта NDWI и сопоставления многолетних временных рядов в единой геоинформационной среде для количественной оценки сезонной изменчивости водоёма. Результаты исследования имеют практическое значение для дистанционного мониторинга водных ресурсов, оценки гидрологического состояния территории и поддержки решений в области экологического контроля и природопользования.

Ключевые слова: Sentinel-2, Google Earth Engine, NDWI, дистанционное зондирование, водоём, сезонная динамика, временной ряд, площадь водной поверхности, спутниковый мониторинг.

1 ВВЕДЕНИЕ

Поверхностные водоёмы являются важнейшим компонентом природных и хозяйственных систем, а их площадь и сезонная изменчивость выступают чувствительными индикаторами климатических колебаний, водохозяйственного режима и антропогенного воздействия. В последние годы зарубежные исследователи уделяют особое внимание дистанционному мониторингу поверхностных вод, поскольку спутниковые наблюдения позволяют получать сопоставимую и регулярную информацию о пространственно-временной динамике водных объектов. По данным глобальных исследований, изменения водной поверхности имеют выраженный региональный характер и нередко отражают совокупное влияние природных и антропогенных факторов, что делает задачу многолетнего анализа особенно актуальной [2, 3].

Существенную роль в развитии методов выделения водных объектов сыграли спектральные индексы, среди которых одним из наиболее распространённых является NDWI, предложенный С. Макфитерсом для повышения контрастности открытой водной поверхности на спутниковых изображениях [1]. Дальнейшее развитие спутниковых систем наблюдения, в частности миссии Sentinel-2, обеспечило новые возможности для изучения водоёмов благодаря высокой пространственной детализации, 13 спектральным каналам и высокой повторяемости съёмки. В работах зарубежных авторов показано, что материалы Sentinel-2 позволяют эффективно выделять водные объекты, уточнять их контуры и отслеживать изменения площади как в природных, так и в урбанизированных ландшафтах [4-7].

Отдельное значение для современных исследований имеет использование облачных геоинформационных платформ, прежде всего Google Earth Engine, которая предоставляет доступ к большому архиву спутниковых данных и инструментам их автоматизированной обработки [3]. Применение этой платформы позволяет формировать длительные временные ряды, выполнять предобработку изображений, рассчитывать индексы водной поверхности и проводить сравнительный анализ без необходимости создания локальной вычислительной инфраструктуры. Зарубежные прикладные исследования подтверждают, что сочетание данных Sentinel-2, индекса NDWI и среды Google Earth Engine является эффективным инструментом мониторинга как крупных, так и малых динамичных водоёмов, включая объекты с быстро меняющейся береговой линией [3, 8].

Вместе с тем по совокупности опубликованных работ можно заключить, что значительная часть исследований сосредоточена либо на совершенствовании алгоритмов выделения воды, либо на глобальной инвентаризации водных ресурсов, тогда как вопросы сопоставимого внутригодового и межгодового анализа конкретного водоёма по единому временному ряду остаются практически значимыми и методически востребованными. В этой связи актуальным является исследование, в котором на основе данных Sentinel-2, расчёта NDWI и обработки в Google Earth Engine выполняется анализ сезонной динамики площади водоёма за 2024, 2025 годы и первые три месяца 2026 года. Такой подход позволяет выявить закономерности сезонных колебаний водной поверхности, сопоставить особенности разных лет наблюдения и расширить возможности оперативного дистанционного мониторинга водных ресурсов.

2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Исходные данные и общая схема исследования

В качестве исходных данных в исследовании использовались мультиспектральные спутниковые изображения Sentinel-2 Level-2A, доступные в облачной платформе Google Earth Engine. Пространственный анализ выполнялся в пределах заранее заданной области интереса ROI, соответствующей контуру исследуемого водоёма и прилегающей территории. Для обеспечения сопоставимости результатов анализ проводился по месяцам за 2024, 2025 годы и первые три месяца 2026 года. Основной логикой обработки являлось формирование месячных композитов, расчёт спектральных водных индексов, выделение водной поверхности и последующее вычисление её площади [9-11].

Предварительная обработка изображений включала фильтрацию по облачности и маскирование пикселей, не пригодных для дальнейшего анализа. Для этого использовался слой классификации сцены SCL продукта Sentinel-2, на основе которого исключались пиксели облаков, теней облаков и высокоаэрозольных участков. После очистки сцены для каждого месяца формировался медианный композит, что позволяло уменьшить влияние случайных шумов, остаточной облачности и единичных артефактов наблюдения [12-14].

2.2. Спектральная модель выделения водной поверхности

Математическая основа исследования базируется на анализе отражательной способности водной поверхности в различных спектральных диапазонах. Вода, как правило, характеризуется сравнительно более высокой отражательной способностью в зелёном диапазоне и низкой отражательной способностью в ближнем и среднем инфракрасном диапазонах. Это свойство используется при расчёте нормализованных индексов водности.

Основным индексом в работе является нормализованный водный индекс NDWI (Normalized Difference Water Index), вычисляемый по формуле:

$$NDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{NIR}}{\rho_{Green} + \rho_{NIR}}, \quad (1)$$

где: ρ_{Green} - отражательная способность в зелёном канале, ρ_{NIR} - отражательная способность в ближнем инфракрасном канале.

Для данных Sentinel-2 формула принимает вид:

$$NDWI = \frac{B3 - B8}{B3 + B8}, \quad (2)$$

где: $B3$ - зелёный спектральный канал Sentinel-2, $B8$ - ближний инфракрасный канал Sentinel-2.

Чем выше значение $NDWI$, тем выше вероятность того, что рассматриваемый пиксель соответствует открытой водной поверхности. В исследуемой задаче бинаризация индекса выполнялась по условию:

$$W(x, y, t) = \begin{cases} 1, & NDWI(x, y, t) > \tau, \\ 0, & NDWI(x, y, t) \leq \tau, \end{cases} \quad (3)$$

где: $W(x, y, t)$ - бинарная водная маска для пикселя с координатами (x, y) в момент времени t , τ - порог сегментации.

В данной работе в качестве порогового значения использовалось:

$$\tau = 0.$$

Следовательно, окончательная модель выделения воды на основе 2-3 записывается как:

$$W(x, y, t) = \begin{cases} 1, & \frac{B3(x, y, t) - B8(x, y, t)}{B3(x, y, t) + B8(x, y, t)} > 0, \\ 0, & \frac{B3(x, y, t) - B8(x, y, t)}{B3(x, y, t) + B8(x, y, t)} \leq 0. \end{cases} \quad (4)$$

2.3. Формирование месячных композитов

Поскольку отдельные спутниковые сцены могут содержать шумы, облачность и частичные пропуски, для каждого месяца формировался композитный снимок. Пусть $I_{y,m}^{(k)}(x, y)$ - k -е изображение Sentinel-2, полученное в году y и месяце m . Тогда месячный композит определялся как медианное значение по набору доступных наблюдений:

$$\tilde{I}_{y,m}(x, y) = \text{median}\left\{I_{y,m}^{(1)}(x, y), I_{y,m}^{(2)}(x, y), \dots, I_{y,m}^{(n_{y,m})}(x, y)\right\}, \quad (5)$$

где: $\tilde{I}_{y,m}(x, y)$ - медианный месячный композит, $n_{y,m}$ - число пригодных сцен в данном месяце.

Использование медианного композита повышает устойчивость оценки, снижая влияние выбросов и остаточных облачных пикселей. На базе каждого месячного композита далее вычислялся NDWI, а затем строилась бинарная карта водной поверхности.

2.4. Расчёт площади водоёма

После построения бинарной маски водной поверхности для каждого временного интервала выполнялся расчёт площади водоёма. В основе данного этапа лежит суммирование площадей всех пикселей, отнесённых к классу воды в пределах исследуемой области. Если бинарная функция водной маски обозначена как $W(x, y, t)$, то для каждого пикселя она принимает значение 1, если пиксель принадлежит водной поверхности, и 0 - в противном случае. Тогда общая площадь водоёма в момент времени t определяется как сумма площадей всех пикселей, удовлетворяющих условию водности:

$$A(t) = \sum_{(x,y) \in ROI} W(x, y, t) a_{pix}(x, y), \quad (6)$$

где $A(t)$ - площадь водоёма в момент времени t , ROI - исследуемая область, $W(x, y, t)$ - бинарная маска воды, а $a_{pix}(x, y)$ - площадь одного пикселя.

При использовании снимков Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м площадь одного пикселя для каналов, применяемых при расчёте индекса NDWI, составляет:

$$a_{pix} = 10 \times 10 = 100 \text{ м}^2,$$

тогда площадь водоёма в квадратных метрах может быть записана в виде:

$$A(t) = \sum_{(x,y) \in ROI} W(x, y, t) \cdot 100. \quad (7)$$

Для практического анализа и сопоставления результатов площадь водной поверхности целесообразно выражать в гектарах. Поскольку 1 гектар равен 10000 м^2 , окончательная формула принимает вид:

$$A_{ha}(t) = \frac{1}{10000} \sum_{(x,y) \in ROI} W(x, y, t) a_{pix}(x, y). \quad (8)$$

С учётом постоянной площади пикселя для 10-метровых данных Sentinel-2 это выражение упрощается до следующего вида:

$$A_{ha}(t) = \frac{1}{10000} \sum_{(x,y) \in ROI} W(x, y, t) \cdot 100. \quad (9)$$

В среде Google Earth Engine данная операция реализуется с использованием функции `pixelArea()`, которая автоматически вычисляет площадь каждого пикселя в квадратных метрах. После этого бинарная маска воды умножается на растр площадей пикселей, а затем выполняется агрегирование значений в пределах контура исследуемого водоёма. Такой подход обеспечивает корректный расчёт площади даже в тех случаях, когда пространственное разрешение или геометрия пикселей могут изменяться в зависимости от проекции и условий обработки.

Расчёт площади водоёма основан на поэлементном суммировании площадей пикселей, классифицированных как вода, с последующим переводом результата в гектары. Полученные значения служат количественной основой для построения временного ряда и дальнейшего анализа сезонной и межгодовой динамики водной поверхности.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование проводилось на объекте Туябугузского водохранилища, расположенного на территории Узбекистана. Выбор данного водоёма в качестве объекта дистанционного мониторинга обусловлен его важным гидрологическим и хозяйственным значением, а также выраженной сезонной изменчивостью площади водной поверхности. Анализ выполнялся на основе спутниковых данных Sentinel-2 с использованием платформы Google Earth Engine, что позволило сформировать сопоставимый временной ряд значений площади водоёма за 2024, 2025 годы и первые три месяца 2026 года. В качестве основного индикатора выделения водной поверхности использовался индекс NDWI, на основе которого были получены количественные оценки динамики площади водоёма и проведён их сравнительный межгодовой анализ.

По результатам обработки спутниковых изображений Sentinel-2 и расчёта индекса NDWI был сформирован временной ряд площади водной поверхности водоёма за 2024, 2025 годы и первые три месяца 2026 года. При интерпретации результатов следует учитывать, что значение за февраль 2024 года не отражает реальное состояние водоёма, поскольку соответствующий месячный композит оказался искажён облачностью. Аналогично нулевые значения для апреля–декабря 2026 года не должны рассматриваться как фактическое отсутствие воды, так как на момент проведения исследования данные за эти месяцы ещё отсутствовали.

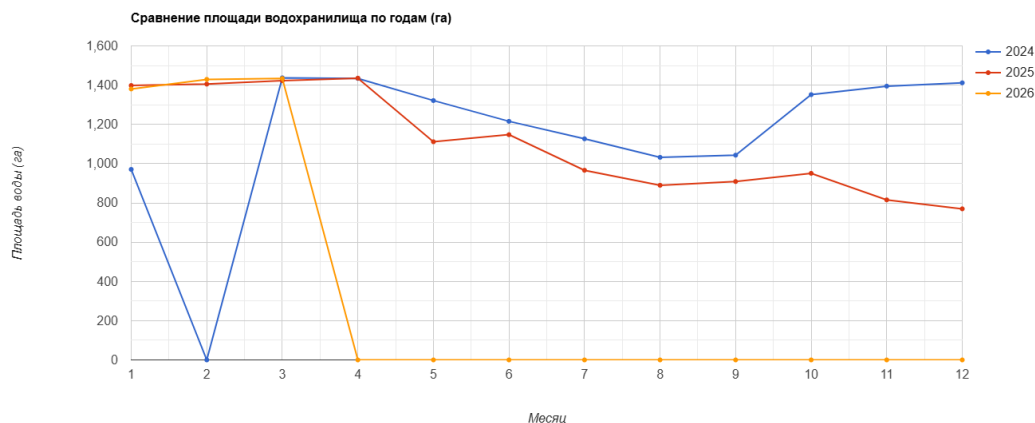


Рис. 1. Динамика изменения площади водоёма

По результатам обработки спутниковых изображений Sentinel-2 и расчёта индекса NDWI был сформирован временной ряд площади водной поверхности водоёма за 2024, 2025 годы и первые три месяца 2026 года. При интерпретации результатов следует учитывать, что значение за февраль 2024 года не отражает реальное состояние водоёма, поскольку соответствующий месячный композит оказался искажён облачностью. Аналогично нулевые значения для апреля–декабря 2026 года не должны рассматриваться как фактическое отсутствие воды, так как на момент проведения исследования данные за эти месяцы ещё отсутствовали (таблица 1).

Для корректного межгодового сопоставления 2026 года целесообразно сравнивать только первые три месяца наблюдений. Такой подход позволяет избежать методической ошибки, связанной с включением в анализ формальных нулевых значений, которые не отражают реальную площадь водной поверхности (таблица 2).

Таблица 1. Динамика площади водоёма по месяцам в 2024-2026 гг., га

Месяц	2024	2025	2026
Январь	970.76	1398.16	1380.53
Февраль	н/д*	1405.30	1429.37
Март	1437.19	1422.81	1433.74
Апрель	1434.37	1435.56	н/д**
Май	1321.48	1111.43	н/д**
Июнь	1215.66	1147.58	н/д**
Июль	1126.59	966.21	н/д**
Август	1032.12	889.80	н/д**
Сентябрь	1043.25	908.91	н/д**
Октябрь	1351.58	950.71	н/д**
Ноябрь	1394.87	815.38	н/д**
Декабрь	1411.73	769.86	н/д**

* н/д - данные недостоверны из-за облачности на снимках за февраль 2024 года.

** н/д - данные отсутствуют, так как на момент анализа 2026 год представлен только январём, февралём и мартом.

Таблица 2. Сравнительный анализ площади водоёма за январь-март 2024-2026 гг., га

Месяц	2024	2025	2026
Март	1437.19	1422.81	1433.74
Апрель	1434.37	1435.56	н/д**
Август	1032.12	889.80	н/д**

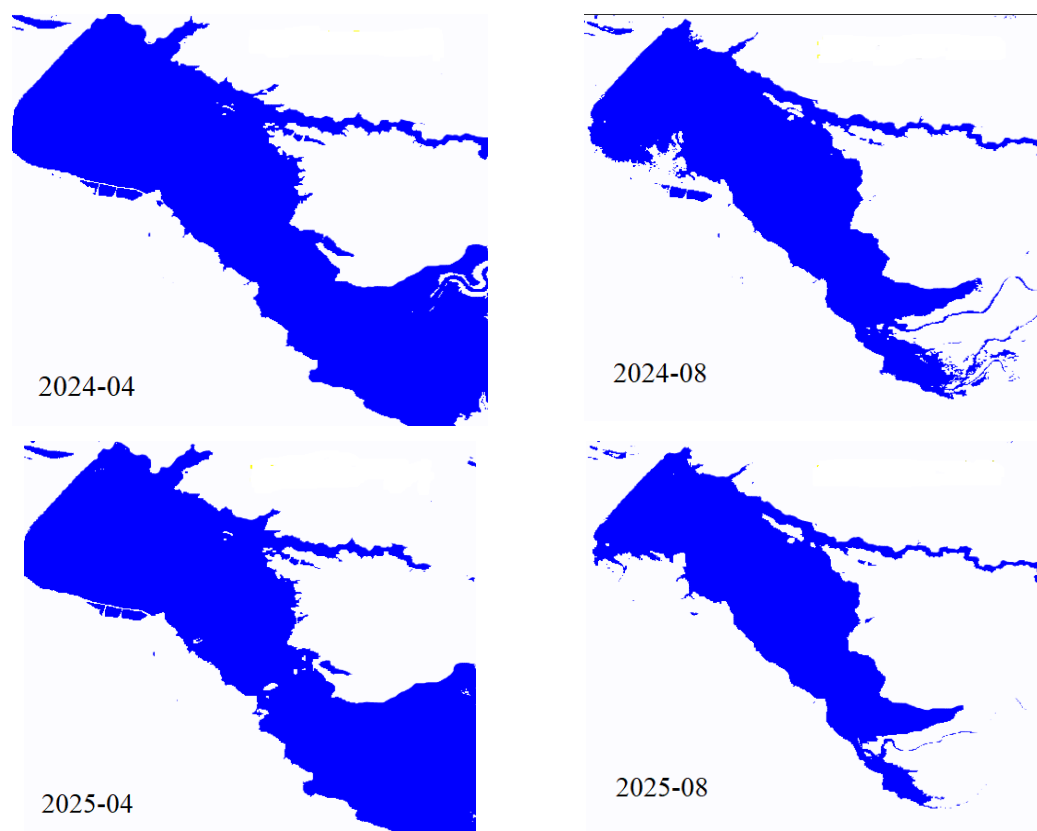


Рис. 1. Площадь водоёма за весеннее и летнее период

Анализ полученного временного ряда показывает, что в 2024 году после высоких значений в марте и апреле наблюдалось постепенное уменьшение площади водоёма в летне-осенний период с последующим восстановлением к концу года. Минимальные значения в пределах достоверных наблюдений были зафиксированы в январе, тогда как максимальные - в марте и апреле. Следует отметить, что февраль 2024 года должен быть исключён из интерпретации сезонной динамики как недостоверное наблюдение.

В 2025 году площадь водной поверхности оставалась высокой в январе–апреле, после чего с мая началось выраженное сокращение. Наиболее заметное снижение наблюдалось в мае по сравнению с апрелем, а затем тенденция к уменьшению площади сохранялась практически до конца года. Минимальное значение было зарегистрировано в декабре, что свидетельствует о более выраженной межсезонной убыли водной поверхности по сравнению с 2024 годом.

Данные за январь–март 2026 года демонстрируют стабильно высокую площадь водоёма: 1380.53 га в январе, 1429.37 га в феврале и 1433.74 га в марте. По сравнению с аналогичными месяцами 2025 года январское значение 2026 года несколько ниже, тогда как в феврале и марте наблюдается незначительное превышение. Это позволяет предположить сохранение относительно благоприятного водного режима в начале 2026 года, однако окончательные выводы о годовой динамике могут быть сделаны только после получения данных за последующие месяцы.

В целом сравнительный анализ временного ряда показывает, что наиболее полные и репрезентативные данные для межгодового сопоставления имеются для 2024 и 2025 годов, тогда как 2026 год на данном этапе может рассматриваться только как предварительный. Поэтому в научной интерпретации следует либо ограничить анализ 2026 года первым кварталом, либо отдельно оговорить, что значения за апрель–декабрь отсутствуют и не участвуют в статистическом сравнении.

4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования была разработана и апробирована методика дистанционного мониторинга сезонных изменений площади Туябугузского водохранилища, Узбекистан, на основе спутниковых данных Sentinel-2, платформы Google Earth Engine и водного индекса NDWI. Сформированный временной ряд за 2024, 2025 годы и первые три месяца 2026 года позволил количественно оценить внутригодовую и межгодовую динамику водной поверхности. Установлено, что площадь водоёма характеризуется выраженной сезонной изменчивостью: в отдельные периоды наблюдается расширение водной поверхности, тогда как в другие месяцы фиксируется её сокращение, что отражает особенности гидрологического режима исследуемого объекта.

Сравнительный анализ показал, что наиболее устойчиво высокие значения площади водоёма отмечались в начале 2025 и 2026 годов, тогда как в 2025 году в последующие месяцы наблюдалась более выраженная тенденция к уменьшению площади водной поверхности. При этом интерпретация результатов должна учитывать ограничения исходных данных: значение за февраль 2024 года оказалось недостоверным вследствие облачности, а данные за апрель–декабрь 2026 года отсутствуют, поскольку на момент проведения исследования анализ охватывал только первый квартал 2026 года. Несмотря на это, полученные результаты позволяют достоверно проследить основные тенденции сезонной динамики и подтвердить информативность временного ряда, построенного по данным спутникового мониторинга [15].

Практическая значимость работы заключается в том, что предложенный подход обеспечивает оперативную, воспроизводимую и наглядную оценку состояния водоёма без необходимости проведения трудоёмких наземных измерений. Использование Google Earth Engine в сочетании с индексами водности открывает возможности для регулярного экологического и гидрологического мониторинга водных объектов, а также для поддержки управленческих решений в области водопользования. Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением временного интервала наблюдений, включением данных за полный 2026 год, сравнением результатов NDWI и MNDWI, а также с применением дополнительных методов верификации для повышения точности оценки площади водной поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *McFeeters S.K.* The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features. *International Journal of Remote Sensing*. 1996.
- [2] *Xu H.* Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2006;27(14):3025–3033.
- [3] *Drusch M., Del Bello U., Carlier S., Colin O., Fernandez V., Gascon F., Hoersch B., Isola C., Laberinti P., Martimort P., Meygret A., Spoto F., Sy O., Marchese F., Bargellini P.* Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*. 2012;120:25–36. doi:10.1016/j.rse.2011.11.026.
- [4] *Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R.* Google Earth Engine: Planetary-scale Geospatial Analysis for Everyone. *Remote Sensing of Environment*. 2017;202:18–27.

- [5] *Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S.* High-resolution Mapping of Global Surface Water and Its Long-term Changes. *Nature*. 2016;540(7633):418–422. doi:10.1038/nature20584.
- [6] *Du Y., Zhang Y., Ling F., Wang Q., Li W., Li X.* Water Bodies' Mapping from Sentinel-2 Imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m Spatial Resolution Produced by Sharpening the SWIR Band. *Remote Sensing*. 2016;8(4):354. doi:10.3390/rs8040354.
- [7] *Yang X., Zhao S., Qin X., Zhao N., Liang L.* Mapping of Urban Surface Water Bodies from Sentinel-2 MSI Imagery at 10 m Resolution via NDWI-Based Image Sharpening. *Remote Sensing*. 2017;9(6):596. doi:10.3390/rs9060596.
- [8] *Kaplan G., Avdan U.* Object-based Water Body Extraction Model Using Sentinel-2 Satellite Imagery. *European Journal of Remote Sensing*. 2017;50(1):137–143. doi:10.1080/22797254.2017.1297540.
- [9] *Feyisa G. L., Meilby H., Fensholt R., Proud S.R.* Automated Water Extraction Index: A New Technique for Surface Water Mapping Using Landsat Imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2014;140:23–35. doi:10.1016/j.rse.2013.08.029.
- [10] *Jones S.K., Fremier A.K., DeClerck F.A., Smedley D., Pieck A. O., Mulligan M.* Big Data and Multiple Methods for Mapping Small Reservoirs: Comparing Accuracies for Applications in Agricultural Landscapes. *Remote Sensing*. 2017;9(12):1307. doi:10.3390/rs9121307.
- [11] *Рахманов Х.Э., Фаттаева Д.А., Ахмеджанов Р., (2023).* Синтез и анализ индекс-ных изображений для выявления динамики изменения русла реки Амударья на облачной платформе ГЕЕ. *Международный Журнал Теоретических и Прикладных Вопросы Цифровых Технологий*, 1(3), –С. 54–60.
- [12] *Condeça J., Nascimento J., Barreiras N.* Monitoring the Storage Volume of Water Reservoirs Using Google Earth Engine. *Water Resources Research*. 2022;58:e2021WR030026.
- [13] *Casal G.* Assessment of Sentinel-2 to Monitor Highly Dynamic Small Water Bodies: The Case of Louro Lagoon (Galicia, NW Spain). *Oceanologia*. 2022;64(1):88–102.
- [14] *Li J., Peng B., Wei Y., Ye H.* Accurate Extraction of Surface Water in Complex Environment Based on Google Earth Engine and Sentinel-2. *PLOS ONE*. 2021;16(6):e0253209.
- [15] *Jiang Z., Jiang W., Ling Z., Wang X., Peng K., Wang C.* Surface Water Extraction and Dynamic Analysis of Baiyangdian Lake Based on the Google Earth Engine Platform Using Sentinel-1 for Reporting SDG 6.6.1 Indicators. *Water*. 2021;13(2):138. doi:10.3390/w13020138.

Поступила в редакцию 11.10.2025

Цитирование: Фаттаева Д.А. (2026). Мониторинг сезонных изменений площади водоёма на основе Sentinel-2 и Google Earth Engine. *Международный журнал теоретических и прикладных вопросов цифровых технологий*, 9(1), –С. 132–138. <https://doi.org/10.62132/ijdt.v9i1.358>.

MONITORING SEASONAL CHANGES IN RESERVOIR AREA BASED ON SENTINEL-2 AND GOOGLE EARTH ENGINE

*Fattaeva D.A.*¹

¹ Samarkand branch of Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Samarkand, Uzbekistan

Abstract. This article examines monitoring seasonal changes in reservoir area based on Sentinel-2 data using the Google Earth Engine platform and the NDWI water index based on a time series for 2024, 2025, and the first three months of 2026. A comparative analysis of intra-annual and interannual water surface dynamics was performed, which allowed us to identify seasonal patterns in reservoir area changes and assess the differences between the studied periods. The scientific novelty of the work lies in the integrated application of automated satellite data processing, NDWI calculation, and comparison of long-term time series in a unified geographic information environment to quantitatively assess the reservoir's seasonal variability. The results of the study have practical significance for remote monitoring of water resources, assessing the hydrological state of the territory, and supporting decisions in the field of environmental monitoring and nature management.

Keywords: Sentinel-2, Google Earth Engine, NDWI, remote sensing, reservoir, seasonal dynamics, time series, water surface area, satellite monitoring.