УДК 528.88; 556 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-109-122*

Оригинальная статья/Original paper

Мониторинг уровня воды озера Сарыкамыш на основе данных дистанционного зондирования Земли

С. Б. Калабаев

salauat.kalabaev@gmail.com

Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, г. Ташкент, Республика Узбекистан
Ташкентский государственный аграрный университет, г. Ташкент, Республика Узбекистан

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Озера и происходящие в них гидрологические процессы являются важными индикаторами глобальных экологических и климатических преобразований. Изменения уровня и объема воды в озерах тесно связаны не только с природными факторами (осадками, испарением, температурным режимом), но и с антропогенной деятельностью. Поэтому регулярный мониторинг динамики уровня воды в озерах имеет важное значение для эффективного управления водными ресурсами, совершенствования региональных климатических моделей и оценки экологических рисков. **Методы.** В настоящем исследовании проанализированы изменения уровня воды оз. Сарыкамыш, расположенного на границе Узбекистана и Туркменистана, на основе данных спутниковой альтиметрии TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3 и Sentinel-3 за период 2001–2024 гг. **Результаты.** Согласно этому анализу, средний рост уровня воды в оз. Сарыкамыш составляет +0,16 м/год. Мониторинг альтиметрических данных составляет научную базу для более глубокого понимания гидрологического режима оз. Сарыкамыш, создания надежной основы для долгосрочного прогноза изменений уровня воды и формирования стратегий управления водными ресурсами в Приаралье.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: озеро Сарыкамыш, уровень воды, альтиметрия, TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3, Sentinel-3

Для цитирования: Калабаев С. Б. Мониторинг уровня воды озера Сарыкамыш на основе данных дистанционного зондирования Земли // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 1. С. 109–122. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-109-122; EDN: JIHYTM

© Калабаев С. Б., 2026

Monitoring of water level of Lake Sarygamysh based on Earth remote sensing data

Salauat B. Kalabaev

salauat.kalabaev@gmail.com

Hydrometeorological Research Institute, Tashkent, Uzbekistan
Tashkent State Agrarian University, Tashkent, Uzbekistan

ABSTRACT

Relevance. Lakes and the hydrological processes occurring within them are important indicators of global environmental and climatic transformations. Changes in lake water level and volume are closely linked not only to natural factors (precipitation, evaporation, temperature regime) but also to anthropogenic activities. Therefore, regular monitoring of lake water level dynamics is essential for effective water resources management, improvement of regional climate models, and assessment of environmental risks. **Methods.** This study analyzes changes in the water level of Lake Sarygamysh, located on the border between Uzbekistan and Turkmenistan, using satellite altimetry data from TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3, and Sentinel-3 for the period 2001–2024. **Results.** According to the analysis, the average rate of water level rise in Lake Sarygamysh is +0.16 m/year. Monitoring based on altimetric data provides a scientific foundation for a deeper understanding of the hydrological regime of Lake Sarygamysh, establishes a reliable basis for long-term forecasting of water level changes, and supports the development of water resources management strategies in the Aral Sea region.

KEYWORDS: Lake Sarygamysh, water level, altimetry, TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3, Sentinel-3

For citation: Kalabaev S. B. Monitoring of water level of Lake Sarygamysh based on Earth remote sensing data. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 1. P. 109–122. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-109; EDN: JIHYTM

ВВЕДЕНИЕ

Озера играют важную роль в водном балансе Земли, климате и локальном экологическом равновесии. Через изменения своего уровня они отражают не только природные процессы, но и влияние антропогенных факторов. Поэтому регулярный мониторинг уровня озер необходим для управления водными ресурсами, оценки изменения климата и гидрологического моделирования. Однако нехватка традиционных наблюдательных станций, их неравномерное географическое распределение и отсутствие в удаленных регионах затрудняют получение достоверных данных для многих озер.

Альтиметрические данные широко используются не только для определения изменений уровня озер, но и для оценки динамики объема воды, калибровки гидрологических моделей и анализа влияния изменения климата на водные ресурсы. Вместе с тем такие проблемы, как сложности обработки альтиметрических данных, влияние прибрежных зон, фильтрация шумов и повышение точности измерений, по-прежнему находятся в центре внимания исследователей. Таким образом, спутниковая альтиметрия приобретает важное научное

и практическое значение как современный, надежный и глобально применимый метод определения уровня озер, дополняющий, а в некоторых случаях и заменяющий традиционные гидрометрические наблюдения.

В последние годы глобальное потепление климата, диспропорции в режиме осадков и температуры, а также расширение гидротехнических сооружений, оросительных систем и коллекторно-дренажных сетей в результате деятельности человека оказывают значительное влияние на гидрологический режим озер. Эти процессы ярко проявляются в таких явлениях, как сокращение Аральского моря и, напротив, наполнение оз. Сарыкамыш.

Оз. Сарыкамыш является одним из крупнейших равнинных озер Средней Азии, расположено на границе Узбекистана и Туркменистана, в примыкающей к чинку части плато Устюрт. В формировании современной котловины озера важную роль сыграли процессы водной эрозии, водной аккумуляции, дефляции и суффозии. Бассейн Сарыкамыша характеризуется низменностями и принадлежит к системе замкнутого накопления воды, отличаясь карстовым рельефом, склонами крутизной до 100 м и солеными болотами [1]. Площадь водосбора ограничена на севере и северо-западе плато Устюрт, на северо-востоке и востоке – Туранской равниной, на юге – пустыней Каракумы (рис. 1).

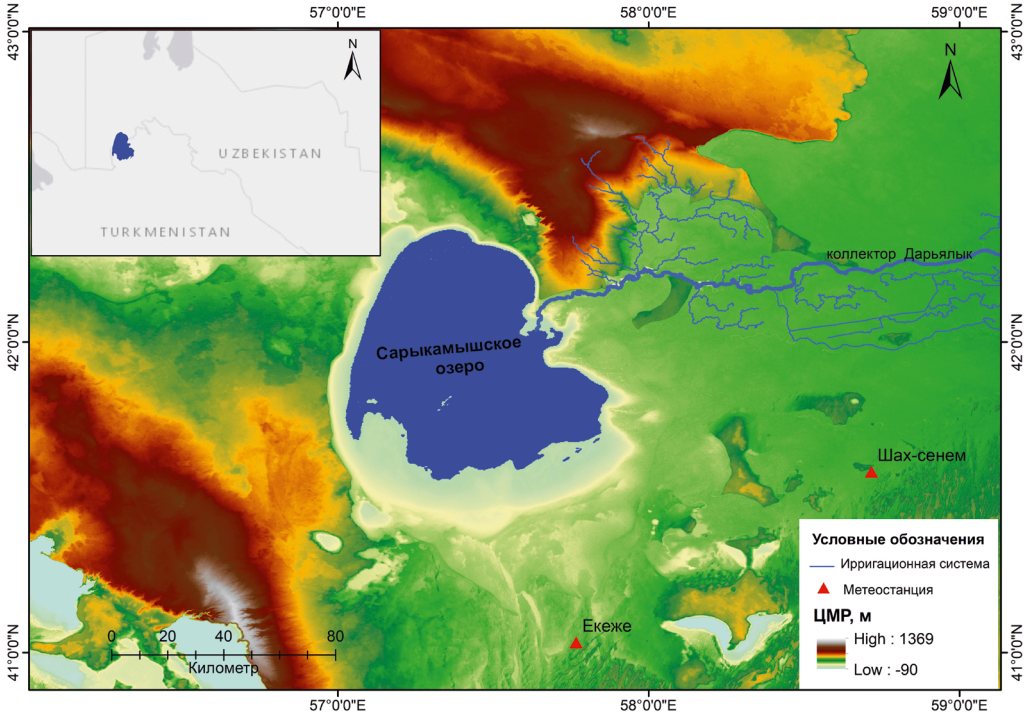


Рис. 1. Географическое положение оз. Сарыкамыш
Fig. 1. Geographical location of Lake Sarygamysh

В исторические периоды воды Амударьи неоднократно заполняли Сарыкамышскую котловину, случались подъемы уровня озера, а впоследствии, в результате изменения русла реки, его высыхание. В отдельные периоды воды Амударьи переливались из оз. Сарыкамыш и стекали в Каспийское море по руслу Узбоя. По данным А. В. Шпитникова (1969 г.), в результате поступления вод Амударьи в Сарыкамышскую котловину уровень озера поднимался на 3–8 м, и такие события наблюдались в 1878, 1889, 1896, 1921 и 1934 годах. К середине 1960-х годов высохшая котловина озера была покрыта мощным слоем соли, лишь в отдельных понижениях сохранились участки соленой воды, подпитываемые грунтовыми водами [1, 2].

Гидрологический режим оз. Сарыкамыш в течение длительного времени оставался недостаточно изученным. Первоначальные данные по этому вопросу были собраны экспедициями института «Киевгидропроект» (1971 г.), Туркменского УГМ (1976, 1985 гг.) и САНИГМИ (1980–1985 гг.). В дальнейшем состояние и гидрологическая динамика озера изучались также Министерством водного хозяйства СССР. В последние годы современное состояние оз. Сарыкамыш проанализировано А. Г. Костяным, С. А. Лебедевым, И. С. Зонном, О. Ю. Лавровой и Д. М. Соловьевым (2011 г.) с использованием спутниковых снимков [3–5].

Основной целью данного исследования является мониторинг динамики уровня воды – одного из гидрологических параметров оз. Сарыкамыш – методами дистанционного зондирования, в частности на основе данных спутниковой альтиметрии.

Научные задачи исследования заключаются в следующем:

– формирование базы данных по уровню воды оз. Сарыкамыш на основе измерений спутниковой альтиметрии;

– заполнение пропусков в наборе данных временных рядов с помощью методов интерполяции;

– статистический анализ многолетних тенденций изменения уровня воды в озере.

Результаты данного исследования создают важную научную основу для более глубокого изучения гидрологического режима оз. Сарыкамыш и совершенствования мониторинга водных ресурсов.

Объектом исследования является оз. Сарыкамыш, предметом – определение уровня воды озера на основе данных дистанционного зондирования.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Развитие технологий спутниковой альтиметрии в последние годы создало новые возможности для определения уровня воды. Благодаря радиолокационным и лазерным альтиметрическим миссиям, таким как TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3, CryoSat-2, Sentinel-3, ICESat-2, определяется уровень водных объектов на поверхности Земли и формируются долгосрочные данные по уровню

воды для многих озер. Основными преимуществами этого метода являются глобальный охват, регулярная частота наблюдений и возможность получения длительных исторических данных.

За последние двадцать лет объем и качество данных, полученных со спутников для определения уровня воды крупных озер и водных бассейнов, значительно выросли. Гидрологический режим озер и рек Южной Америки, Африки и Сибири успешно изучался с использованием данных спутниковой альтиметрии [6, 7]. Уровень воды в нижнем течении р. Волги [8], в каскаде Волжских водохранилищ, а также в озерах Ильмень и Ладога, расположенных на границе России и Эстонии, исследовали с использованием спутниковых альтиметрических измерений [9].

При определении высоты по спутниковым данным первоначально измеряется время прохождения T радиоимпульса от момента излучения до возвращения. Оно умножается на скорость распространения радиоимпульса, равную скорости света ($c \approx 3\times10^8$ м/с), и находится высота диапазона R (дальность), которая вычисляется следующим образом [3, 7]:

$$R = T \times c. \quad (1)$$

Высота поверхности находится как разность высоты альтиметра и высоты диапазона по выражению:

$$h = H - R, \quad (2)$$

где h – высота поверхности относительно эллипсоида, м;

H – высота космического аппарата относительно эллипсоида, м;

R – высота космического аппарата относительно поверхности, м.

Уровень воды рассчитывается относительно геоида. Геоид – это эквипотенциальная поверхность Земли, которая совпадает со средним уровнем моря над океанами и гипотетически расположена под всеми поверхностями суши. Эллипсоид –геометрическая фигура, близкая к форме поверхности Земли.

Однако в определенную высоту необходимо ввести некоторые поправки, учитывающие такие факторы, как атмосферное давление и влияние электронов в ионосфере, волнение водной поверхности и др. (рис. 2). После введения поправок приведенное выше выражение можно записать следующим образом:

$$h = H - R - hT - h_{ион} - h_{инст} - h_г, \quad (3)$$

где h_T – поправка, зависящая от влажности и давления в тропосфере;

$h_{ион}$ – поправка, зависящая от электронов в ионосфере;

$h_{инст}$ – инструментальная поправка;

$h_г$ – поправка на геоид.

В целом, альтиметрический радар способен точно измерять уровень воды в идеальных условиях, т. е. при отсутствии влажности и давления в тропосфере, электронов в ионосфере и вертикального движения Земли.

Альтиметрический радар обладает такими преимуществами, как нечувствительность к облакам или туману, возможность проведения измерений практически в любой точке мира, получение данных практически в реальном времени, высокая точность продукции, а также наличие непрерывной серии данных с октября 1992 г. С начала 1990-х годов постоянно осуществляются измерения с помощью спутниковых радиолокационных альтиметров серий ERS-1/2 (European Remote Sensing Satellite), Envisat (Environmental Satellite) и Saral (Satellite with ARgos and Altika), а также Topex/Poseidon (Topographic Experiment), Jason-1/2/3 (Joint Altimetry Satellite Oceanography Network), GFO (Geosat Follow-On), HY-2A (Haiyang) и CryoSat-2 [3, 10, 11].

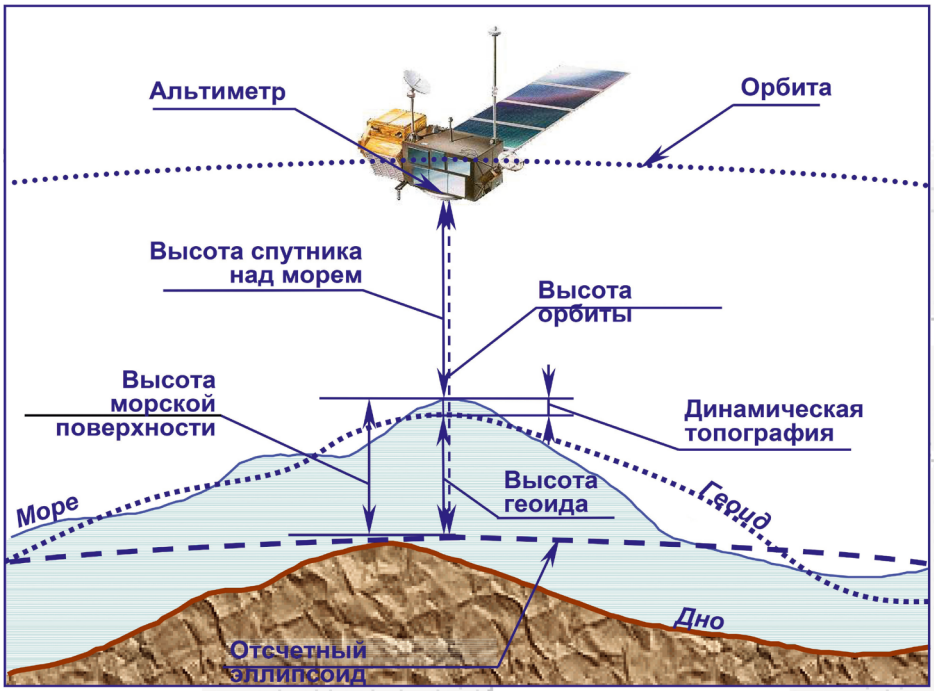


Рис. 2. Принципы измерения высоты (С. А. Лебедев, 2006 г.)
Fig. 2. Principles of height measurement (S. A. Lebedev, 2006 г.)

Sentinel-3 является одной из альтиметрических миссий нового поколения, предназначенных для долгосрочных наблюдений, его первый спутник Sentinel-3A был выведен на орбиту в феврале 2016 г. Во всех альтиметрических миссиях измерения проводятся только в надирном направлении, т. е. по вертикальным точкам непосредственно под спутником. По этой причине их пространственное покрытие ограниченно, что является одним из основных недостатков этих наблюдений [12].

Альтиметрические данные представляются с задержкой на 2–24 ч, а в некоторых случаях – до 30–75 сут, в зависимости от уровня их обработки [3]. Для гидрологических анализов альтиметрические данные делятся на две основные категории: GDR (Geophysical Data Records) и SGDR (Sensor Geophysical Data Records). Этот набор данных включает все геофизические параметры, необходимые для расчета уровня воды для каждого сегмента трассы. В настоящее время они представляются в стандартизированном формате NetCDF (Network Common Data Form).

В данном исследовании для определения высоты уровня воды оз. Сарыкамыш использовался архивный набор измерений за период 2001–2024 гг. из специализированной базы данных G-REALM (Global Reservoirs and Lakes Monitor).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно результатам исследования, в базе данных G-REALM за период 2001–2024 гг. имеются регулярные данные наблюдений за уровнем воды оз. Сарыкамыш с 10-дневными интервалами (рис. 3). Таким образом, в данном исследовании альтиметрические данные были загружены из базы G-REALM в формате NetCDF для оценки высоты уровня воды.

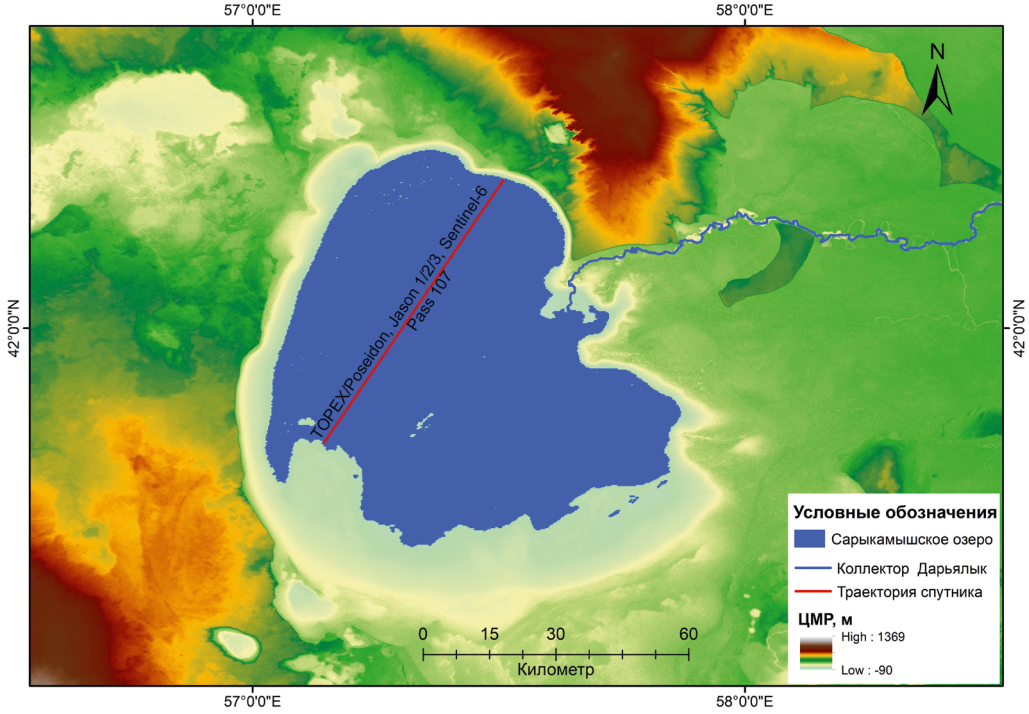


Рис. 3. Траектории спутников-альтиметров TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3 и Sentinel-6
Fig. 3. Satellite altimeter tracks for TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3, and Sentinel-6

В настоящее время точность спутниковых альтиметрических измерений значительно возросла по сравнению с радиовысотомерами первого поколения. Миссии TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3 и Sentinel-6 оснащены высокоточными радиолокационными альтиметрическими системами, общей особенностью которых является работа на орбите с коротким (10-дневным) циклом повторения (рис. 4).

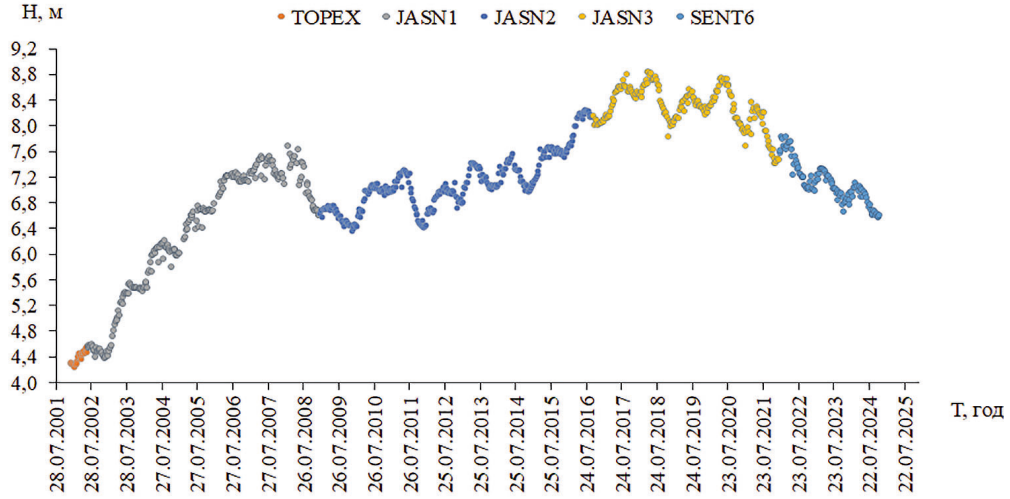


Рис. 4. Значения уровня воды в оз. Сарыкамыш, определенные с помощью различных альтиметров
Fig. 4. Water level values of Lake Sarygamysh derived from different altimeters

В долгосрочных спутниковых рядах наблюдений иногда встречаются разрывы или пропуски в данных. В таких случаях для восстановления данных были опробованы методы линейной интерполяции, k-ближайших соседей, по-

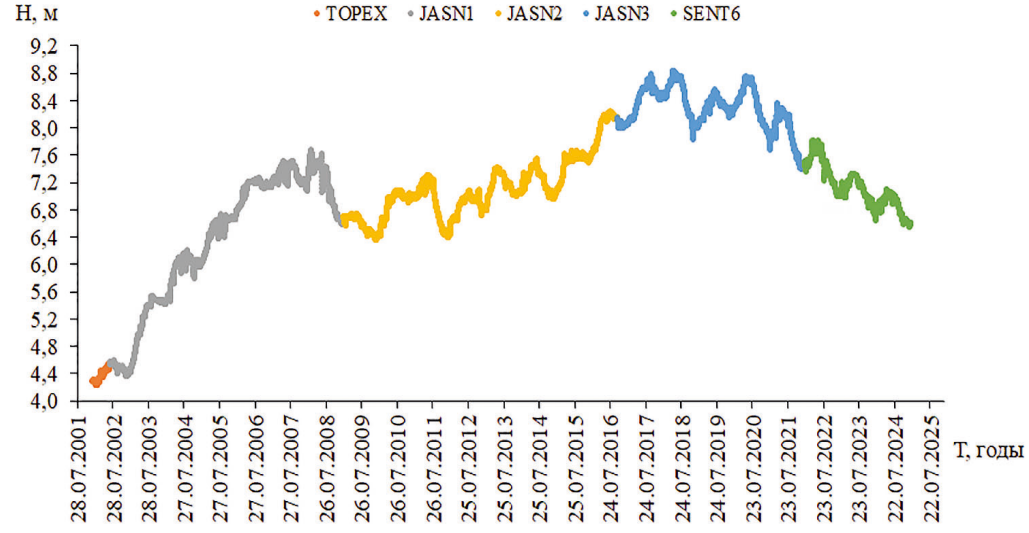


Рис. 5. Восстановленные значения уровня воды озера Сарыкамыш
Fig. 5. Reconstructed water level values of Lake Sarygamysh

линомиальной интерполяции 2-го и 3-го порядка, кусочно-кубической интерполяции Эрмита.

Согласно результатам предыдущих исследований, метод линейной интерполяции дает наиболее приемлемые результаты для заполнения пропусков в рядах спутниковых альтиметрических данных [3]. Пропуски в альтиметрических данных были заполнены с помощью метода линейной интерполяции (рис. 5).

В результате восстановлены ежедневные данные уровня воды в озере за 2001–2024 гг. Поскольку на территории озера отсутствуют данные in situ, возможности сравнения заполненных альтиметрических данных нет.

На следующем этапе исследования были рассчитаны статистические характеристики долгосрочных стандартных рядов, такие как среднее, максимальное, минимальное значения, стандартное отклонение и дисперсия (таблица).

Таблица. Статистическое описание серии спутниковых наблюдений
Table. Statistical description of the satellite observation series

Период	Тенденция	Статистический показатель	Значение, м	Время наблюдения
2001-2024	+0,16	σ	0,91	-
2002–2007	+0,56	s^2	0,82	-
2008–2009	–0,60	$H_{ср}$, m	7,12	2013
2010–2020	+0,15	$H_{макс}$, m	8,84	24–29.04.2018
2021–2024	–0,36	$H_{мин}$, m	4,23	07–09.02.2002

Примечание: σ – стандартное отклонение, s^2 – дисперсия, $H_{ср}$ – средняя высота уровня воды, $H_{макс}$ – максимальная высота уровня воды, $H_{мин}$ – минимальная высота уровня воды.

Согласно результатам статистического расчета восстановленных данных, самый низкий уровень воды в 2001–2024 гг. был зафиксирован 24–29 февраля 2002 г. и составил 4,23 м. Самый высокий уровень воды наблюдался 24–29 апреля 2018 г. – 8,84 м. Из анализа многолетних значений уровня воды выяснилось, что дисперсия составила 0,82 м, а значение среднего квадратического отклонения – 0,91 м. Изучение многолетних значений уровня воды Сарыкамыша за 2001–2024 гг. показало, что за этот период можно выделить четыре этапа (рис. 6).

Первый приходится на 2001–2007 гг. На этой стадии наблюдалась тенденция годового повышения уровня воды оз. Сарыкамыш, средняя скорость подъема составила +0,56 м/год. Гидрологический режим озера в этот период характеризовался в основном положительным водным балансом, что объясняется относительным увеличением притока воды в регион.

Второй этап охватывает 2008–2009 гг. и является более коротким по сравнению с другими стадиями. В эти годы проявилась тенденция к понижению

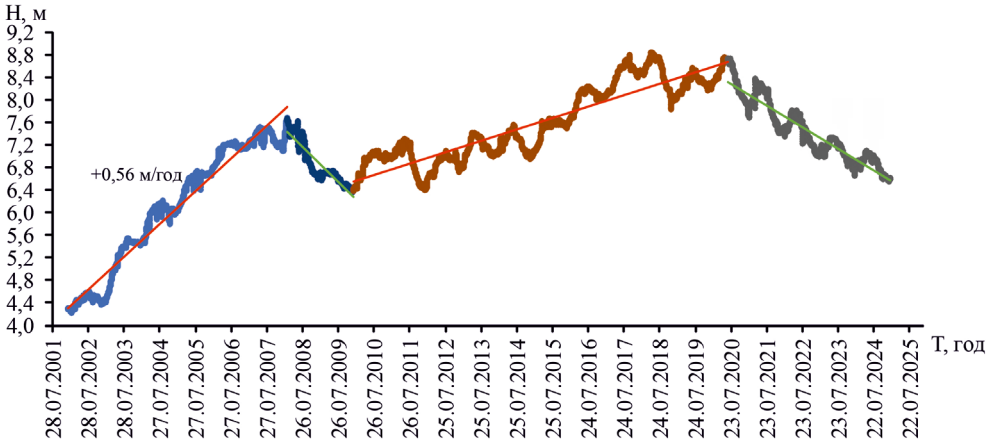


Рис. 6. Многолетняя изменчивость уровня воды оз. Сарыкамыш
Figure 6. Long-term water level variability of Lake Sarygamysh

уровня воды, средний показатель снижения составил –0,60 м/год. Такая ситуация связана с уменьшением объема стока, засушливыми климатическими условиями.

Третий этап, 2010–2020 гг., считается длительным и стабильным. В течение этого периода уровень воды вновь вернулся к тенденции роста, средняя годовая скорость повышения составила +0,15 м/год. Этот процесс объясняется относительным восстановлением баланса водных ресурсов, увеличением стока Амударьи и объема водозабора на орошение в Хорезмской и Ташаузской областях, а также улучшением региональных гидрологических условий.

На последнем этапе, 2021–2024 гг., уровень воды вновь перешел к тенденции снижения. Среднегодовая скорость снижения составила –0,36 м/год, что связано с наблюдаемым в последние годы в регионе потеплением климата, усилением процессов испарения и уменьшением речного стока. Таким образом, результаты анализа показывают, что динамика уровня воды оз. Сарыкамыш обладает пространственно-временной изменчивостью и развивается в различных направлениях под влиянием природных и антропогенных факторов. Однако в конце исследования, т. е. по окончании периода наблюдений, был отмечен положительный тренд повышения уровня воды по сравнению с началом периода.

Основным фактором, определяющим гидрологический режим оз. Сарыкамыш, является приток воды. По Дарьялыкскому коллектору в озеро ежегодно поступает приблизительно 3–5 км^3 воды [5]. В настоящее время получить достоверные наземные данные о расходе коллектора со стороны Туркменистана невозможно, поэтому изменения уровня воды в озере были статистически сопоставлены со среднегодовым расходом воды Амударьи на гидропосту Туя-Муюн. Результаты анализа показали низкий коэффициент корреляции (r = 0,43). Это объясняется тем, что сток коллектора формируется главным об-

разом за счет дренажно-возвратных вод орошаемых земель, а гидрологические режимы коллектора и реки существенно различаются.

Тем не менее, начиная с 2020 г. на фоне снижения водности Амударьи наблюдается понижение уровня воды и в озере, что указывает на наличие косвенного влияния речного стока на состояние озера.

Метеорологические факторы также играют важную роль в межгодовой изменчивости уровня воды (рис. 7.). Для оценки влияния метеорологических условий использованы данные ближайшей к озеру метеостанции Екеже. Согласно результатам статистического анализа атмосферных осадков и температуры воздуха, связь между уровнем воды и температурой воздуха оказалась весьма слабой (r = 0,36), тогда как с количеством осадков выявлена более значимая корреляция (r = 0,60).

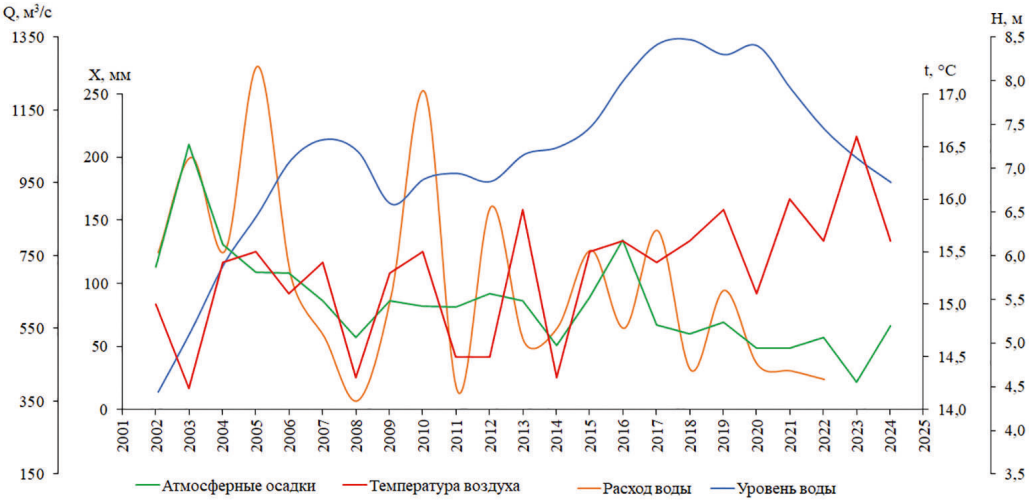


Рис. 7. График изменения уровня воды в сочетании с речным стоком и метеорологическими показателями
Fig. 7. Graph of water level changes in combination with river flow and meteorological indicators

Например, одним из периодов с наибольшим уровнем воды за последнее десятилетие был 2016 г., когда уровень озера составил 8,02 м. В этот же год количество атмосферных осадков достигло 134 мм, что примерно на 40 мм больше по сравнению с предыдущими годами. Это подтверждает, что количество осадков является важным метеорологическим фактором, влияющим на изменение уровня озера после притока.

В целом, начиная с 2020 г. наблюдается устойчивое снижение уровня воды в озере. Этот процесс объясняется, с одной стороны, уменьшением стока Амударьи и снижением количества атмосферных осадков по годам, а с другой – повышением температуры воздуха, приводящим к усилению процессов испарения.

ВЫВОДЫ

В результате анализа, основанного на альтиметрических данных за период 2001–2024 гг., было установлено, что динамика уровня воды оз. Сарыкамыш характеризовалась поэтапной изменчивостью. В течение периода исследования наблюдались тенденции как повышения, так и понижения уровня воды в несколько этапов, что объясняется взаимодействием природных и антропогенных факторов.

В первые годы уровень воды в озере находился в устойчивой тенденции роста под влиянием положительного водного баланса, впоследствии же наблюдалось снижение из-за засухи, уменьшения речного стока и увеличения испарения. Начиная с 2010-х годов уровень воды проявил тенденцию к повторному повышению благодаря относительному увеличению водопритока и улучшению гидрологических условий. Хотя в последние годы вновь было отмечено кратковременное снижение, в целом уровень воды завершил период со средним годовым повышением на +0,16 м/год.

Результаты исследования показывают, что начиная с 2020 г. в озере наблюдается устойчивая тенденция ежегодного снижения уровня воды. Эта динамика, в свою очередь, объясняется усиливающимся воздействием процессов изменения климата в регионе, уменьшением количества атмосферных осадков и ростом температуры воздуха. Если данная тенденция сохранится, продолжающееся понижение уровня воды может оказать негативное воздействие на само озеро и экологическое состояние прилегающей территории, привести к снижению разнообразия флоры и фауны, а также нарушению естественного баланса экосистем.

Мониторинг на основе альтиметрических данных открывает новые возможности для оценки долгосрочного гидрологического состояния оз. Сарыкамыш и совершенствования стратегий управления водными ресурсами.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The author declares no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аденбаев Б. Е., Калабаев С. Б. Гидрография, морфометрия и мониторинг современного состояния озера Джылтырбас // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 5. С. 43–53. https://doi.org/10.35567/19994508_2023_5_4
2. Калабаев С. Б., Артыкова Ф. Я., Аденбаев Б. Е. Анализ долгосрочных тенденций осадков в Южном Приаралье // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 4. С. 317–332. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-4-317-332
3. Артыкова Ф. Я., Калабаев С. Б. Перспективы использования спутниковых данных для определения уровня воды в крупных озерах // Современные проблемы дистанционного

зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 4. С. 251–259. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-4-251-259.
4. Артыкова Ф. Я., Калабаев С. Б. Долгосрочные фазовые изменения озер Южного Приаралья // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление 2025. № 1. С. 40–56. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-40-56
5. Калабаев С. Б., Йўлдошбаева М. Р. Куйи Амударе сув объектларининг гидрографик тавсифи // Ўзбекистон География жамияти ахбороти. 2019. 56-жилд. Б. 235–239.
6. Kostianoy A. G., Kostianaia E. A., Lebedev S. A., Serykh I. V., Prokofiev Y. A. Interannual variability in the level of lakes in northwestern Russia / Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference “Fundamental and Applied Aspects of Geology, Geophysics and Geoecology Using Modern Information Technologies”. Maykop State Technological University. Maykop, 17–21 May 2021. Part 1. P. 158–167.
7. Lebedev S. A., Kostianoy A. G. Satellite Altimetry of the Caspian Sea / Proceedings of the Symposium on 15 Years of Progress in Radar Altimetry. Venice. Italy. 13–18 March 2006. Vol. SP 614.
8. Troitskaya Y. I., Rybushkina G. V., Soustova I. A., Balandina G. N., Lebedev S. A., Kostianoy A. G. Satellite altimetry of inland water bodies // Hydrophysical Processes. 2012. Vol. 39. P. 184–199.
9. Костяной А. Г., Лебедев С. А., Казьмина М. В., Цепелев В. Ю., Варлашина В. М., Нещадимова Г. Г. Спутниковый мониторинг трансграничных вод России и Эстонии. М.: Сигнал, 2012. 16 с.
10. Калабаев С. Б. Landsat тасвирлари ердамида ер усти сув объектлари чегарасини аниқлашда спектрал индекслардан фойдаланиш имкониятлари // Гидрометеорология ва атроф муҳит мониторинги. 2023. № 4. Б. 36–43.
11. Калабаев С. Б., Артикова Ф. Я. Сунъий йўлдош кузатув маълумотлари бўйича кўлларни хариталаш ва мониторинг қилиш // Гидрометеорология ва атроф-муҳит мониторинги. 2024. № 1. Б. 87–92.
12. Калабаев С. Б., Аденбаев Б. Е. Оценка изменений площадей водной поверхности озера Междуречье по спутниковым снимкам / Материалы международной научно-практической конференции «Роль современной геоинформационной картографии, методов и технологий дистанционного зондирования в географических исследованиях». Ташкент, 2024. С. 505–508.

REFERENCES

1. Adenbaev B. E., Kalabaev S. B. Hydrography, morphometry and monitoring of the current state of Lake Diltirvas. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 5. P. 43–53. https://doi.org/10.35567/19994508_2023_5_4 (in Russian)
2. Kalabaev S. B., Artikova F. Ya., Adenbaev B.E. Analysis of long-term precipitation trends in the Southern Aral Sea region. *Current problems in remote sensing of the Earth from space.* 2025. Vol. 22. № 4. P. 317–332. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-4-317-332
3. Artikova F. Ya., Kalabaev S. B. Prospects for using satellite data to determine water levels in large lakes. *Current problems in remote sensing of the Earth from space.* 2024. Vol. 21. No. 4. P. 251–259. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-4-251-259.
4. Artikova F. Ya., Kalabaev S. B. Long-Term Phase Changes In The South Aral Sea Region Lakes. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 1. P. 40–56. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-40-56
5. Kalabaev S. B., Yuldoshbaeva M. R. Hydrographic description of water bodies of the Lower Amu Darya. *Bulletin of the Geographical Society of Uzbekistan.* 2019. Vol. 56. P. 235–239.
6. Kostianoy A. G., Kostianaia E. A., Lebedev S. A., Serykh I. V., Prokofiev Y. A. Interannual variability in the level of lakes in northwestern Russia / Proceedings of the VI International

Scientific and Practical Conference "Fundamental and Applied Aspects of Geology, Geophysics and Geoecology Using Modern Information Technologies". Maykop State Technological University. Maykop, 17–21 May 2021. Part 1. P. 158–167.
7. Lebedev S. A., Kostianoy A. G. Satellite Altimetry of the Caspian Sea / Proceedings of the Symposium on 15 Years of Progress in Radar Altimetry. Venice. Italy. 13–18 March 2006. Vol. SP 614.
8. Troitskaya Y. I., Rybushkina G. V., Soustova I. A., Balandina G. N., Lebedev S. A., Kostianoy A. G. Satellite altimetry of inland water bodies. *Hydrophysical Processes.* 2012. Vol. 39. P 184–199.
9. Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Kazmina M. V., Tsepelev V. Y., Varlashina V. M., Neschadimova T. G. Satellite Monitoring of Transboundary Waters of Russia and Estonia. M.: Signal, 2012. 16 p.
10. Kalabaev S. B. Possibilities of using spectral indices in determining the boundaries of surface water bodies using Landsat. *Hydrometeorology and environmental monitoring*. 2023. No. 4. P. 36–43.
11. Kalabaev S. B., Artikova F. Ya. Mapping and monitoring of lakes based on satellite observation data. *Hydrometeorology and environmental monitoring*. 2024. No. 1. P. 87–92.
12. Kalabaev S. B., Adenbaev B. E. Evaluation of the changing water surface of the Lake Mezhdurechye with satellite images / Proceedings of international scientific/practical conference "The role of modern geoinformational cartography, methods and technological remote sensing in geographic research". Tashkent, 2024. P. 505–508.

Сведения об авторе:

Калабаев Салауат Бахитбай ули, заведующий лабораторией математического моделирования гидрологических процессов и водных ресурсов, Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Узбекистан, 100052, Ташкент, ул. 1-й проезд Бодомзор йули, 72; старший преподаватель кафедры экологии и охраны окружающей среды Ташкентского государственного аграрного университета, Узбекистан, 100700, Ташкентская область, Кибрайский район, ул. Университетская, 2а; https://orcid.org/0000-0001-5188-7383; e-mail: salauat.kalabaev@gmail.com

About the author:

Salauat B. Kalabaev, Head of the Laboratory of Mathematical Modeling of Hydrological Processes and Water Resources, Hydrometeorological Research Institute, Uzbekistan, 100052, Tashkent, 1st passage Bodomzor yuli str., 72; Senior Lecturer of the Department of Ecology and Environmental Protection, Tashkent State Agrarian University, Uzbekistan, 100700, Tashkent Region, Kibray District, University Street, 2a; https://orcid.org/0000-0001-5188-7383; e-mail: salauat.kalabaev@gmail.com

Поступила в редакцию / Received 31.10.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 14.11.2025.
Принята к публикации / Accepted 29.12.2025.