УДК: 528.88:556 https://doi.org/10.5281/zenodo.20784983

Калабаев С.Б.[1,2], Саидов У.И.[1], Исмаилова М.Б.[1]

[1]Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Ташкент, Узбекистан
[2]Ташкентский государственный аграрный университет, Ташкент, Узбекистан

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ УРОВНЯ ВОДЫ ОЗЕРА САРЫКАМЫШ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Аннотация. *Озёра и происходящие в них гидрологические процессы являются важными индикаторами глобальных экологических и климатических изменений. Изменения уровня и объёма воды в озёрах тесно связаны не только с природными факторами (осадками, испарением, температурным режимом), но и с антропогенной деятельностью. Поэтому регулярный мониторинг динамики уровня воды в озёрах имеет важное значение для эффективного управления водными ресурсами, совершенствования региональных климатических моделей и оценки экологических рисков. В настоящем исследовании проанализированы изменения уровня воды озера 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. Согласно результатам анализа, средний рост уровня воды в озере Сарыкамыш составляет +0,16 м/год. Мониторинг уровня воды в озере по данным спутниковой альтиметрии формирует научную основу для более глубокого понимания гидрологического режима озера Сарыкамыш, создания надёжной базы для долгосрочного прогноза изменений уровня воды и разработки стратегий управления водными ресурсами в Приаралье.*

Ключевые слова: *озеро Сарыкамыш, уровень воды, альтиметрия, TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3, Sentinel-3.*

Kalabaev S.B. [1,2], Saidov U.I.[1], Ismoilova M.B.[1]

[1]Hydrometeorological Research Institute, Tashkent, Uzbekistan
[2]Tashkent State Agrarian University, Tashkent, Uzbekistan

ANALYSIS OF CHANGES IN THE WATER LEVEL OF LAKE SARYKAMYSH BASED ON REMOTE SENSING DATA

Abstract. *Lakes and the hydrological processes occurring within them are important indicators of global environmental and climatic changes. Changes in lake water level and volume are closely linked not only to natural factors (precipitation, evaporation, and 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 modeling, and assessment of environmental risks. 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. According to the analysis, the average rate of water level rise in Lake Sarygamysh is +0,16 m/year. Monitoring of lake water levels using satellite altimetry provides a scientific basis for a deeper understanding of the hydrological regime of Lake Sarygamysh, establishes a reliable foundation for long-term forecasting of water level changes, and supports the development of water resources management strategies in the Aral Sea region.*

Key words: *Lake Sarygamysh, water level, altimetry, TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3, Sentinel-3.*

Введение и постановка проблемы. Озёра 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 озёр 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 озёр.

В последние годы глобальное потепление климата, изменение температурного режима и режима атмосферных осадков, а также активное строительство гидротехнических сооружений, оросительных систем и коллекторно-дренажных сетей в результате антропогенной деятельности оказывают значительное влияние на гидрологический режим озёр. Эти процессы наглядно проявляются в таких явлениях, как сокращение Аральского моря и, напротив, наполнение озера Сарыкамыш.

Оз. Сарыкамыш является одним из крупнейших равнинных озёр 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 солёными болотами [1]. Площадь водосбора ограничена на севере и северо-западе плато Устюрт, на северо-востоке и востоке - Туранской равниной, на юге - пустыней Каракумы.

В исторические периоды воды Амударьи неоднократно заполняли Сарыкамышскую котловину, случались подъёмы 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 XX века высохшая котловина озера была покрыта мощным слоем соли, лишь в отдельных понижениях сохранились участки солёной воды, подпитываемые грунтовыми водами [3, 4, 5, 10].

Изученность вопроса. Гидрологический режим озера Сарыкамыш на протяжении длительного времени представлял собой сложную научную задачу, оставаясь недостаточно изученным из-за удаленности объекта и нестабильности его формирования. Поскольку существование современного водоема целиком зависит от антропогенного фактора - притока коллекторно-дренажных вод с орошаемых земель Хорезмского оазиса и Дашогузского велаята, - процесс его исследования развивался параллельно с развитием ирригационных систем региона.

Первые системные шаги по изучению водоема были предприняты в начале 1970-х годов, когда озеро вступило в фазу активного наполнения. Фундаментальные данные по морфометрии и гидрологии были собраны экспедициями института “Киевгидропроект” (1971 г.). Эти работы позволили определить первичные параметры чаши озера и прогнозировать динамику его расширения.

В последующее десятилетие мониторинг приобрел более регулярный характер. В период с 1976 по 1985 годы специалистами Туркменского управления по гидрометеорологии (Туркменского УГМ) и Среднеазиатского научно-исследовательского гидрометеорологического института (САНИГМИ) были проведены комплексные исследования. Они зафиксировали темпы повышения уровня воды, изменения площади зеркала и, что немаловажно, динамику минерализации, которая начала расти по мере накопления солей, вымываемых с сельскохозяйственных полей. Дополнительный вклад в изучение гидрологической динамики внесло Министерство водного хозяйства СССР, которое курировало вопросы эксплуатации Дарьялыкского коллектора - одной из основных артерий, питающих Сарыкамыш.

Современный этап исследований характеризуется переходом от эпизодических экспедиций к использованию высокотехнологичных методов дистанционного зондирования Земли. В последние годы состояние озера было детально проанализировано рядом исследователей, в том числе А.Г. Костяным, С.А. Лебедевым, И.С. Зонном, О.Ю. Лавровой, Д.М. Соловьевым (2011), H. Liu, Y. Chen, Z. Ye, Y. Li, Q. Zhang (2019) и Y. Hu, W. Duan, Y. Chen, P. Kayumba, N. Sahu (2021) [13, 16]. Благодаря привлечению архивных и оперативных спутниковых снимков, исследователям удалось с высокой точностью реконструировать изменения береговой линии и колебания уровня воды за последние десятилетия.

Эти современные данные подтвердили, что Сарыкамыш превратился в стабильный, но крайне чувствительный экологический индикатор региона. На сегодняшний день изучение озера продолжается с акцентом на экологическую безопасность, динамику накопления донных отложений и влияние изменения климата на испаряемость с его поверхности. Сарыкамыш остается важнейшим трансграничным объектом, требующим постоянного внимания со стороны ученых Узбекистана и Туркменистана для поддержания экологического равновесия в Приаралье [4, 5, 6, 12].

Цель и задачи работы. 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.

Материалы и методы. 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 озёр. Основными преимуществами этого метода являются глобальный охват, регулярная частота наблюдений и возможность получения длительных исторических данных.

За последние двадцать лет объём и качество данных, полученных со спутников для определения уровня воды крупных озёр и водных бассейнов, значительно возросли. Гидрологический режим озёр и рек Южной Америки, Африки и Сибири успешно изучался с использованием данных спутниковой альтиметрии [11, 14]. Уровень воды в нижнем течении р. Волги [15], в каскаде Волжских водохранилищ, а также в озёрах Ильмень и Ладога, расположенных на границе России и Эстонии, изучался с использованием спутниковых альтиметрических измерений [17].

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 [2, 6, 7]:

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

Высота поверхности находится как разность высоты альтиметра и высоты

диапазона по следующему 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 - это геометрическая фигура, близкая к форме поверхности 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 [8, 15].

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, то есть по вертикальным точкам непосредственно под спутником. По этой причине их пространственное покрытие ограничено, что является одним из основных недостатков этих наблюдений [18].

Альтиметрические данные предоставляются с задержкой от 2-24 ч до, в некоторых случаях, 30-75 сут, в зависимости от уровня их обработки [11]. 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 расчёта 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 NASA Science.

Результаты и обсуждение. Согласно результатам исследования, в базе данных NASA Science за период 2001-2024 гг. имеются регулярные данные наблюдений за уровнем воды оз. Сарыкамыш с 10-дневными интервалами (рис. 1). Таким образом, в данном исследовании альтиметрические данные были загружены из базы данных NASA Science в формате NetCDF для оценки высоты уровня воды.

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.

В долгосрочных спутниковых рядах наблюдений иногда встречаются разрывы или пропуски в данных. В таких случаях для восстановления данных были опробованы методы линейной интерполяции, метода k-ближайших соседей, полиномиальной интерполяции 2-го и 3-го порядка, кусочно-кубической интерполяции Эрмита.

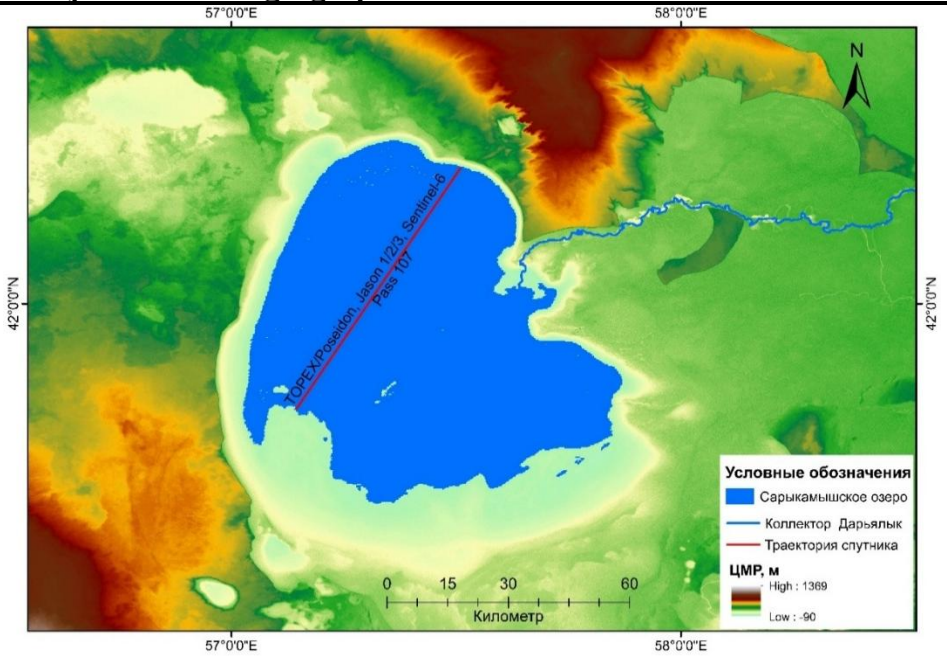


Рис. 1. Траектории спутников-альтиметров TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3 и Sentinel-6

Рисунок составлен авторами на основе программы ArcMap и модели SRTM NASA.

Согласно результатам предыдущих исследований, метод линейной интерполяции даёт наиболее приемлемые результаты для заполнения пропусков в рядах спутниковых альтиметрических данных. Пропуски в альтиметрических данных были заполнены с помощью метода линейной интерполяции (рис. 2).

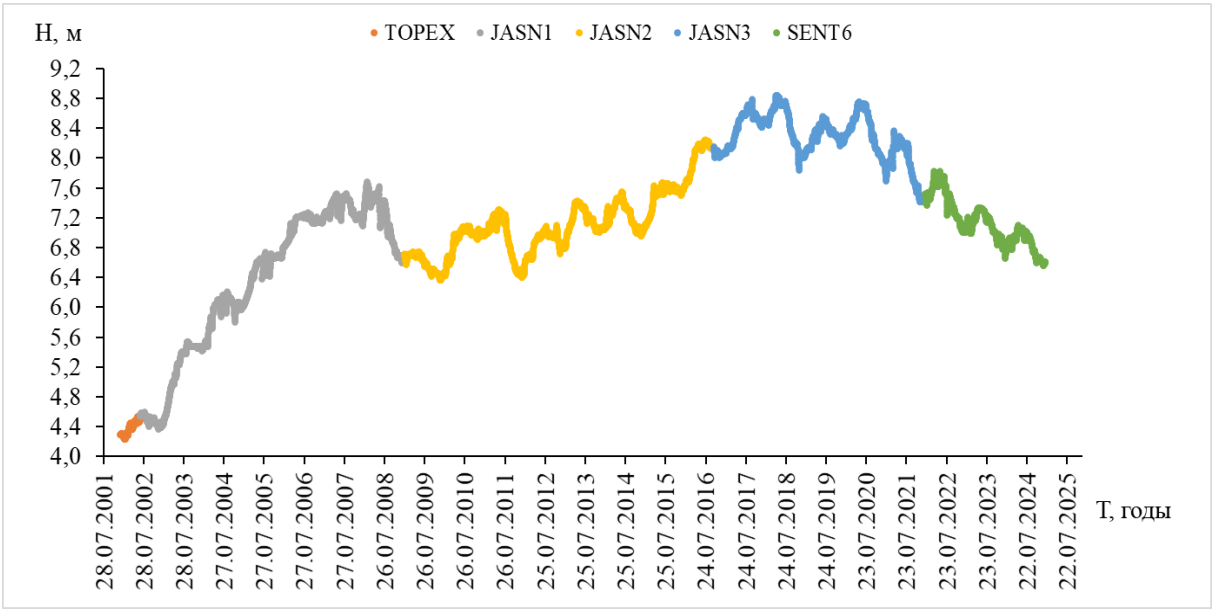


Рис. 2. Восстановленные значения уровня воды озера Сарыкамыш

Рисунок составлен авторами с помощью пакета Microsoft Office.

В результате были 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 (табл. 1).

Таблица 1

Статистическое описание серии спутниковых наблюдений

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.

Таблица составлена авторами с помощью пакета Microsoft Office.

Согласно результатам статистического расчёта 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. и составил 8,84 м. Из анализа многолетних значений уровня воды выяснилось, что дисперсия составила 0,82 м, а значение среднего квадратического отклонения - 0,91 м.

Основным фактором, определяющим гидрологический режим озера, является приток воды. По Дарьялыкскому коллектору в озеро ежегодно поступает приблизительно 3-5 км³ воды [10]. 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 образом 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.

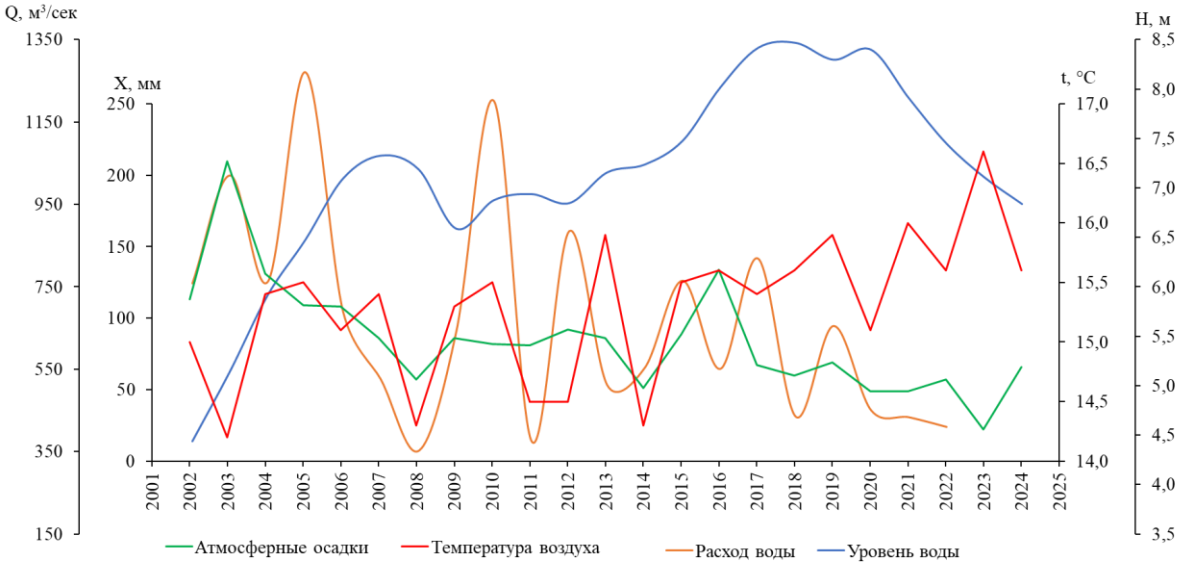


Рис. 3. График изменения уровня воды в сочетании с речным стоком и метеорологическими показателями

Рисунок составлен авторами с помощью пакета Microsoft Office.

Метеорологические факторы также играют важную роль в межгодовой изменчивости уровня воды (рис. 3). 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).

Например, одним из лет 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 [9] , 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 года 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. На основе ретроспективного анализа данных спутниковой альтиметрии за период 2001-2024 гг. было установлено, что гидрологический режим озера Сарыкамыш характеризовался выраженной этапной изменчивостью. В течение последних десятилетий динамика уровня воды не была линейной: наблюдались периоды как относительной стабилизации и повышения, так и значительного снижения водного зеркала. Такая волатильность объясняется сложным взаимодействием естественных климатических циклов и антропогенного воздействия на водосборный бассейн.

В первой половине исследуемого периода (2001-2012 гг.) колебания уровня воды в основном зависели от объемов поступления коллекторно-дренажных вод через системы Дарьялык. Эти объемы, в свою очередь, диктовались интенсивностью орошения сельскохозяйственных угодий в низовьях Амударьи. Природные факторы, такие как сезонные паводки и циклы многоводья, временно компенсировали потери на испарение, поддерживая экосистему озера в относительном равновесии.

Результаты исследования показывают, что начиная с 2020 года, в озере Сарыкамыш установилась устойчивая и прогрессирующая тенденция ежегодного снижения уровня воды. Данная негативная динамика обусловлена эффектом следующих факторов:

• Усиливающееся воздействие глобального изменения климата в Центральноазиатском регионе привело к росту среднегодовых температур, что резко увеличило интенсивность испарения с поверхности озера.

• Сокращение объемов сброса дренажных вод из-за внедрения водосберегающих технологий в сельском хозяйстве или перераспределения стока привело к критическому дефициту водного баланса.

Если текущая тенденция сохранится, продолжающееся обмеление Сарыкамыша может привести к необратимым экологическим последствиям. Прежде всего, это повлечет за собой резкое повышение минерализации воды, что создаст непригодные условия для жизни многих видов рыб и гидробионтов.

Нарушение естественного баланса экосистемы неизбежно приведет к деградации прибрежной флоры и сокращению биоразнообразия фауны, включая места обитания перелетных птиц. Более того, обнажение дна озера создает риск формирования новых очагов пылевых и солевых выносов, что окажет негативное воздействие на здоровье населения и состояние почв прилегающих территорий.

Использованная литература:

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. 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. Scopus ID-59329867100

3. 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

4. Донати Т.А., Нурбаев Д.Д. Многолетние изменения гидрометеорологического режима озеро Сарыкамыш // Труды СНИГМИ имени В.А.Бугаева. Ташкент, Выпуск 162 (243). 2003. С. 81-94.

5. Горелкин Н.Е., Мансимов *М.* Гидрометеорологический, гидрохимический режим и водносолевой баланс оз. Сарыкамыш // Труды СНИГМИ имени В.А.Бугаева. Выпуск 133 (214). 1990. С. 71-83.

6. Калабаев С.Б. Возможности использования спектральных индексов в определении границ поверхностных водных объектов с помощью изображений Landsat // Гидрометеорология и мониторинг окружающей среды. 2023. № 4. С. 36-43. (На узб. яз.).

7. 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.

8. Калабаев С.Б., Артикова Ф.Я. Картографирование и мониторинг озёр по материалам спутникового наблюдения // Гидрометеорология и мониторинг окружающей срелы. 2024. № 1. С. 87-92. (На узб. яз.).

9. 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

10. Калабаев С.Б., Йулдошбаева М.Р. Гидрографическое описание водных объектов Низовьев Амударьи // Известия Географического общества Узбекистана. 2019. Т. 56. С. 235-239. (На узб. яз.).

11. 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. Москва: Сигнал, 2012. 16 с.

12. Рубанов И.В. Озерно-почвенное соленакопление в Узбекистане. Ташкент: Фан, 1977. 156 с.

13. Hu Y., Duan W., Chen Y., Kayumba P., Sahu N. (2021), An integrated assessment of runoff dynamics in the Amu Darya River Basin: Confronting climate change and multiple human activities, 1960–2017, *Journal of Hydrology*, p. 603.

14. Kostianoy A.G., Kostianaia E.A., Lebedev S.A., Serykh I.V., Prokofiev Y.A. (2021), 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, Part 1, pp. 158-167.

15. Lebedev S.A., Kostianoy A.G. (2006), Satellite Altimetry of the Caspian Sea, *Proceedings of the Symposium on 15 Years of Progress in Radar Altimetry*, Venice,Vol. SP 614.

16. Liu H., Chen Y., Ye Z., Li Y., Zhang Q. (2019), Recent Lake Area Changes in Central Asia, *Scientific Reports*, 2019, No. 9:16277.

17. Troitskaya Y.I., Rybushkina G.V., Soustova I.A., Balandina G.N., Lebedev S.A. (2012), Kostianoy A.G. Satellite altimetry of inland water bodies, *Hydrophysical Processes*, Vol. 39, pp. 184-199.

18. Yang L.K., Qin J., Hou J., Lei Y., Wang J., and et. al. (2022), Strict Validation of MODIS Lake Surface Water Temperature on the Tibetan Plateau, *Remote Sens*., Vol. 14, pp. 5454. https://doi.org/10.3390/rs14215454

References:

1. Adenbaev B.E., Kalabaev S.B. (2023), Hydrography, morphometry and monitoring of the current state of Lake Dzhiltyrbas, *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management,* No. 5, pp. 43-53. https://doi.org/10.35567/19994508_2023_5_4 (in Russian)

2. Artikova F.Ya., Kalabaev S.B. (2024), Prospects for using satellite data to determine water levels in large lakes, *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space,* Vol. 21, No. 4, pp.

251-259. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-4-251-259 (in Russian)

3. Artikova F.Ya., Kalabaev S.B. (2025), Long-Term Phase Changes In The South Aral Sea Region Lakes, *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management,* No. 1, pp. 40-56. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-40-56 (in Russian)

4. Donati T.A., Nurbaev D.D. (2003), Long-term changes in the hydrometeorological regime of Lake Sarykamysh, *Proceedings of SANIGMI named after V.A. Bugaev,* Issue 162 (243), pp. 81-94. (in Russian)

5. Gorelkin N.E., Mansimov M. (1990), Hydrometeorological, hydrochemical regime and water-salt balance of Lake Sarykamysh, *Proceedings of SANIGMI named after V.A. Bugaev,* Issue 133 (214), pp. 71-83. (in Russian)

6. Kalabaev S.B. (2023), Possibilities of using spectral indices in determining the boundaries of surface water objects using Landsat images, *Hydrometeorology and Environmental Monitoring,* No. 4, pp. 36-43. (in Uzbek)

7. Kalabaev S.B., Adenbaev B.E. (2024), Estimation of changes in the water surface areas of Lake Mezhdurechye from satellite images, *Materials of the international scientific-practical conference "The role of modern geoinformation cartography, methods and technologies of remote sensing in geographical research",* Tashkent, pp. 505-508. (in Russian)

8. Kalabaev S.B., Artikova F.Ya. (2024), Mapping and monitoring of lakes based on satellite observation data, *Hydrometeorology and Environmental Monitoring,* No. 1, pp. 87-92. (in Uzbek)

9. Kalabaev S.B., Artikova F.Ya., Adenbaev B.E. (2025), Analysis of long-term precipitation trends in the Southern Aral Sea region, *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, Vol. 22, No. 4, pp. 317-332. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-4-317-332 (in Russian)

10. Kalabaev S.B., Yuldoshbaeva M.R. (2019), Hydrographic characteristics of water bodies of the Lower Amudarya, *The Annales of the Geographical Society of Uzbekistan*, Vol. 56, pp. 235-239. (in Uzbek)

11. Kostianoy A.G., Lebedev S.A., Kazmina M.V., Tsepelev V.Yu., Varlashina V.M., Neshchadimova G.G. (2012), *Satellite monitoring of transboundary waters of Russia and Estonia,* Moscow, 16 p. (in Russian)

12. Rubanov I.V. (1977), *Lake-soil salt accumulation in Uzbekistan*, Tashkent, 156 p. (in Russian).

13. Hu Y., Duan W., Chen Y., Kayumba P., Sahu N. (2021), An integrated assessment of runoff dynamics in the Amu Darya River Basin: Confronting climate change and multiple human activities, 1960–2017, *Journal of Hydrology*, p. 603.

14. Kostianoy A.G., Kostianaia E.A., Lebedev S.A., Serykh I.V., Prokofiev Y.A. (2021), 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, Part 1, pp. 158-167.

15. Lebedev S.A., Kostianoy A.G. (2006), Satellite Altimetry of the Caspian Sea, *Proceedings of the Symposium on 15 Years of Progress in Radar Altimetry*, Venice,Vol. SP 614.

16. Liu H., Chen Y., Ye Z., Li Y., Zhang Q. (2019), Recent Lake Area Changes in Central Asia, *Scientific Reports*, 2019, No. 9:16277.

17. Troitskaya Y.I., Rybushkina G.V., Soustova I.A., Balandina G.N., Lebedev S.A. (2012), Kostianoy A.G. Satellite altimetry of inland water bodies, *Hydrophysical Processes*, Vol. 39, pp. 184-199.

18. Yang L.K., Qin J., Hou J., Lei Y., Wang J., and et. al. (2022), Strict Validation of MODIS Lake Surface Water Temperature on the Tibetan Plateau, *Remote Sens*., Vol. 14, pp. 5454. https://doi.org/10.3390/rs14215454

Сведения об авторах:

Калабаев Салауат Бахитбай ули – Научно-исследовательский гидрометеорологический институт (Ташкент, Узбекистан), Ташкентский государственный аграрный университет (Ташкент, Узбекистан), доктор философии (PhD) по географическим наукам. E-mail: salauat.kalabaev@gmail.com.

Саидов Улмас Исматилло угли – Научно-исследовательский гидрометеорологический институт (Ташкент, Узбекистан), младший научный сотрудник.

Исмаилова Мохичехра Бахтияровна – Научно-исследовательский гидрометеорологический институт (Ташкент, Узбекистан), научный сотрудник.

Information about the authors:

Salauat Kalabaev – Hydrometeorological Research Institute (Tashkent, Uzbekistan), Tashkent State Agrarian University (Tashkent, Uzbekistan), Doctor of Philosophy (PhD) in Geographical Sciences. E-mail: salauat.kalabaev@gmail.com.

Ulmas Saidov – Hydrometeorological Research Institute (Tashkent, Uzbekistan), Junior Researcher.

Mokhichekhra Ismailova – Hydrometeorological Research Institute (Tashkent, Uzbekistan), Researcher.

Для цитирования:

Калабаев С.Б., Саидов У.И., Исмаилова М.Б. Анализ изменений уровня воды озера Сарыкамыш по данным дистанционного зондирования Земли // Центральноазиатский журнал географических исследований. 2026. № 1-2. С. 120-129.

For citation:

Kalabaev S.B., Saidov U.I, Ismoilova M.B. (2026), Analysis of changes in the water level of lake Sarykamysh based on remote sensing data, *Central Asian Journal of Geographical Sciences*, No. 1-2, pp. 120-129. (In Russ.).