

ЭКОЛОГИЯ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Научная статья

УДК 556.55:504.45(575.1)

DOI: 10.17072/2079-7877-2026-3-141-152

EDN: OCTGVG



РЕГРЕССИВНАЯ ФАЗА ЭВОЛЮЦИИ АЙДАР-АРНАСАЙСКОЙ СИСТЕМЫ ОЗЕР (УЗБЕКИСТАН)

Сардор Уролович Уролов, Ауфар Миннигазимович Гареев✉

Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия

✉ aufar.gareev@mail.ru

Аннотация. Данная статья посвящена анализу регрессивной фазы эволюции Айдар-Арнасайской системы озер (ААСО), расположенной в Узбекистане и наступившей после 2006 г. На основании обобщения и анализа многолетних данных гидрологического мониторинга, космических снимков и сведений о коллекторно-дренажном стоке установлено, что за 15 лет после указанного года уровень воды снизился на 3,12 м, площадь зеркала сократилась с 3899 до 3702 км², объем уменьшился с 42,1 до 34,2 км³. Сезонные колебания уровня воды составляют 0,56–1,17 м с максимумом в мае и минимумом в ноябре-декабре. Показано, что основным источником питания озерной системы являются коллекторно-дренажные воды (КДВ), содержащие в своем составе высокие концентрации консервативных и неконсервативных загрязняющих веществ, отличающихся лимитирующим признаком вредности и особенностями влияния на сообщества гидробионтов. Однако их объем недостаточен для компенсации потерь на испарение в условиях потепления климата и резкого сокращения попусков воды из Чардаринского водохранилища, расположенного на р. Сырдарья. В этих условиях регрессивная фаза рассматривается как этап эволюции антропогенного водоема при изменении структуры водного баланса, включающей общее снижение приходной части и увеличение объемов потерь воды на испарение с поверхности озерной системы, а также повышение концентраций загрязняющих веществ в нем в условиях преобладающего влияния коллекторно-дренажных вод орошаемых массивов, расположенных в пределах бывшей Голодной степи (Мирзачуля). Показано, что совокупное влияние указанных факторов привело к существенному ухудшению экологических условий в озерной системе, что проявляется в виде активизации процессов эвтрофикации, сокращения биологического разнообразия и др. Это требует необходимости безотлагательного проведения мероприятий по мелиорации водоема. Полученные результаты могут быть использованы при обосновании оптимальных вариантов водопользования и водоохраных мероприятий в бассейне ААСО в целом, в т.ч. с учетом необходимости сохранения благоприятных гидролого-экологических условий в самом водном объекте.

Ключевые слова: Айдар-Арнасайская система озер, регрессивная фаза, уровень воды, площадь водной поверхности, коллекторно-дренажный сток, Чардаринское водохранилище

Для цитирования: Уролов С. У., Гареев А. М. Регрессивная фаза эволюции Айдар-Арнасайской системы озер (Узбекистан) // Географический вестник

ECOLOGY AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT

Original article

DOI: 10.17072/2079-7877-2026-3-141-152

EDN: OCTGVG

REGRESSIVE PHASE OF THE AYDAR-ARNASAY LAKE SYSTEM EVOLUTION (UZBEKISTAN)

Sardor U. Urolov, Aufar M. Gareev ✉

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

✉ aufar.gareev@mail.ru

Abstract. The article analyzes the regressive phase in the evolution of the Aidar-Arnasay lake system (AALS) in Uzbekistan, which began after 2006. Based on the synthesis and analysis of long-term hydrological monitoring data, satellite imagery, and collector-drainage flow information, it has been found that over the 15 years following 2006, the water level dropped by 3.12 m, the surface area shrank from 3,899 to 3,702 km², and the volume decreased from 42.1 to 34.2 km³. Seasonal water level fluctuations ranged from 0.56 to 1.17 m, peaking in May and reaching a minimum in November–December. It is shown that the main water source for the lake system is collector-drainage water (CDW), which contains high concentrations of conservative and non-conservative pollutants characterized by limiting hazard



indicators and specific effects on aquatic communities. However, the CDW volume is insufficient to compensate for evaporative losses under conditions of climate warming and a sharp reduction in water discharges from the Chardara Reservoir on the Syr Darya River. Under these circumstances, the regressive phase is interpreted as a stage in the evolution of an anthropogenic water body during which the water balance structure changes: there occurs a general decrease in inflows and an increase in water losses due to evaporation from the lake surface, along with rising pollutant concentrations driven by the prevailing influence of CDW from irrigated areas within the former Hungry Steppe (Mirzachul). It is shown that the combined effect of these factors has led to a marked deterioration of environmental conditions in the lake system, manifested as increased eutrophication, reduced biodiversity, and other adverse changes. This situation calls for urgent water body reclamation measures. The obtained results can be used to justify optimal water use and water protection strategies in the AALS basin as a whole, including the need to maintain favorable hydrological and ecological conditions in the water body itself.

Keywords: Aidar-Arnasay lake system, regressive phase, water level, surface area, collector-drainage runoff, Chardarya Reservoir

For citation: Urolov S. U., Gareev A. M. Regressive phase of the Aydar-Arnasay lake system evolution (Uzbekistan). *Geographical Bulletin*, 2026, no. 3(78), pp. 141–152. EDN: OCTGVG DOI: 10.17072/2079-7877-2026-3-141-152.

Введение

На основании анализа значительного количества опубликованных работ по территории Центральной Азии [6; 7; 13; 16; 19; 21] можно обратить внимание на то, что основное внимание там уделяется изучению особенностей формирования, пространственной и временной изменчивости солевого состава и концентраций загрязняющих веществ в водных объектах в зависимости от влияния естественных и антропогенных факторов в их бассейнах. В незначительном количестве публикаций представлен анализ характера изменения экологических условий без интерпретации особенностей влияния загрязняющих веществ на сообщества гидробионтов с учетом признаков на популяционном уровне [16]. Какие-либо исследования, направленные на раскрытие закономерностей формирования комплексных показателей загрязнения и их влияния на экологические условия в водных объектах, до сих пор не нашли соответствующей реализации, что требует необходимости их проведения применительно к обоснованию оптимальных вариантов водопользования и водоохраных мероприятий с учетом как экономических, так и экологических критериев.

Айдар-Арнасайская система озер (ААСО) представляет собой крупный водоем в аридной зоне Узбекистана, возникший в результате непреднамеренного влияния хозяйственной деятельности человека на природную среду в ходе освоения Голодной степи (Мирзачуля). Подробное описание истории формирования указанной озерной системы, ее морфометрических характеристик на разных этапах развития, а также динамики изменения комплексных показателей загрязнения вод и их влияния на экосистемы нами было приведено ранее в работе [4]. В ней было показано, что возникновение и последующее развитие озерной системы произошло в результате сброса как коллекторно-дренажных вод с орошаемых массивов, так и попусков из Чардаринского водохранилища, расположенного на р. Сырдарья. Оба источника водного питания приняли основное участие в формировании приходной части водного баланса, развитии самой озерной системы, которая является замкнутым водным объектом, характеризующимся изменяющимися во времени гидрохимическими и гидролого-экологическими условиями. Характерной особенностью является то, что она возникла в результате разлива воды на холмисто-увалистую низменность в пределах Туранской равнины, что привело к формированию многочисленных островов, полуостровов, заливов в периферийной части и сильной изрезанности береговой линии при небольшом значении средней глубины в основной части самого водного объекта. Таким образом, следует констатировать, что произошедшее событие отчетливо отражает характер коренного переустройства (трансформацию) ландшафтов главным образом в результате накопления коллекторно-дренажных вод и попусков воды из Чардаринского водохранилища. Раскрытию причин и характера трансформации ландшафтов в зависимости от влияния тех или иных видов хозяйственной деятельности посвящено значительное количество работ, среди которых следует указать публикации С. А. Бузмакова [1], М. А. Глазовской [5], О. А. Ивановой [9], А. Ю. Кулагина [11], Т. Н. Фурмановой и др. [20]. На примере изучаемой озерной системы характер произошедшей трансформации проявляется в виде формирования антропогенных аквальных комплексов на местах бывших суходольных полупустынных ландшафтов с полной заменой растительных сообществ и животного мира в условиях их взаимодействия и эволюции в зависимости от характера влияния внешних и внутриводоемных факторов.

Следует отметить, что, начиная с 2006 г. по настоящее время, обнаруживается регрессивная фаза эволюции указанной озерной системы, что характеризуется постепенным уменьшением площади зеркала, объемов воды, увеличением концентраций загрязняющих веществ и, соответственно, общим ухудшением экологических условий. Это в основном связано с резким сокращением попусков воды из Чардаринского водохранилища и увеличением объемов поступления коллекторно-дренажных вод, содержащих большие концентрации

загрязняющих веществ с разными признаками негативного влияния на сообщества гидробионтов. При этом обнаруживается, что объемы потерь, обусловленные резким сокращением попусков воды из водохранилища, не компенсируются суммарным поступлением стоков с орошаемых массивов, что сопровождается возникновением ряда неблагоприятных водохозяйственных и экологических последствий. Происходящие изменения требуют необходимости их изучения, анализа и обоснования путей устойчивого водопользования в перспективе с учетом как экономических, так и экологических критериев.

Материалы и методы

В ходе выполнения данного исследования был использован большой объем исходной информации, включающей как материалы многолетних наблюдений различных ведомств и организаций, так и изысканий, проведенных нами в 2018–2024 гг. непосредственно на водном объекте и в пределах его водосбора.

В составе основных источников следует указать: материалы ежегодных наблюдений за уровнем воды ААСО в 2005–2024 гг., полученные из фондов Управления Айдар-Арнасайских озер; данные о попусках из Чардаринского водохранилища и коллекторно-дренажном стоке за 2007–2024 гг., полученные из Министерства водного хозяйства Республики Узбекистан; материалы многолетних наблюдений, проводимых Центром гидрометеорологической службы Узбекистана (1979–2023 гг.); космические снимки Google Earth Pro и Global Surface и др. Материалы собственных изысканий и наблюдений включают отбор проб воды на гидрохимический и гидробиологический анализы по 55 вертикалям, расположенным на 5 профилях и радиальных точках. Места их нахождения отражены на рис. 1.

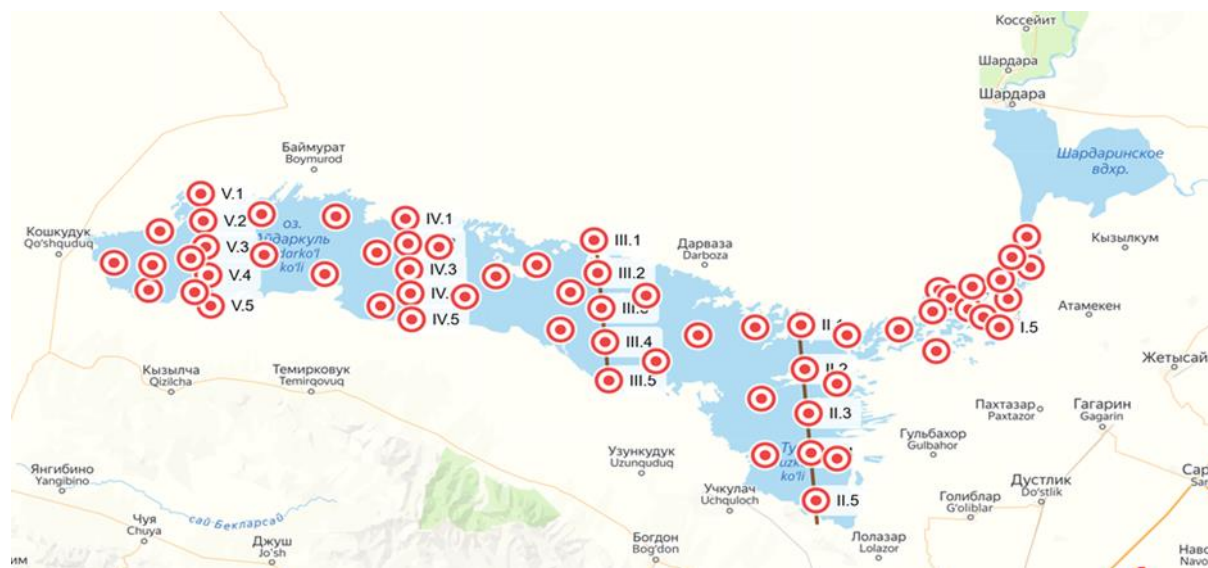


Рис. 1. Места расположения точек отбора проб воды в пределах Айдар-Арнасайской системы озер

Fig. 1. Locations of water sampling points within the Aidar-Arnasay lake system

Среднемесячные и среднегодовые расходы коллекторных вод по замыкающим створам водотоков определялись по Центральному Голодностепскому каналу (ЦГК), по коллекторам Акбулак, Пограничный, р. Клы, ЦК-9, ЦК-11, АРК-1 за 2012–2023 гг. Концентрации загрязняющих веществ, поступающих в озерную систему в составе сточных вод указанных коллекторов, были подробно отражены в работе [4].

Климатические ряды анализировались по среднегодовой температуре воздуха и годовой сумме атмосферных осадков за 1979–2023 гг. по 8 метеостанциям, расположенным в бассейне ААСО. Оценка трендов выполнена с помощью критерия Манна – Кендалла.

Изучение внутригодовой и многолетней динамики изменения уровня воды в озерной системе выполнено по ежегодным наблюдениям за 2005–2024 гг. Корреляционный анализ проведен с вычислением коэффициента детерминации R^2 . Методические подходы, принятые в ходе проведения исследования, отражены на рис. 2.

В целом следует обратить внимание на то, что использованная информация, учитывающая принципы всестороннего анализа влияющих факторов на характеристики изучаемой озерной системы по густоте и продолжительности наблюдений, обеспечивает полномасштабность и достоверность проведенного анализа, что подтверждается полученными результатами.

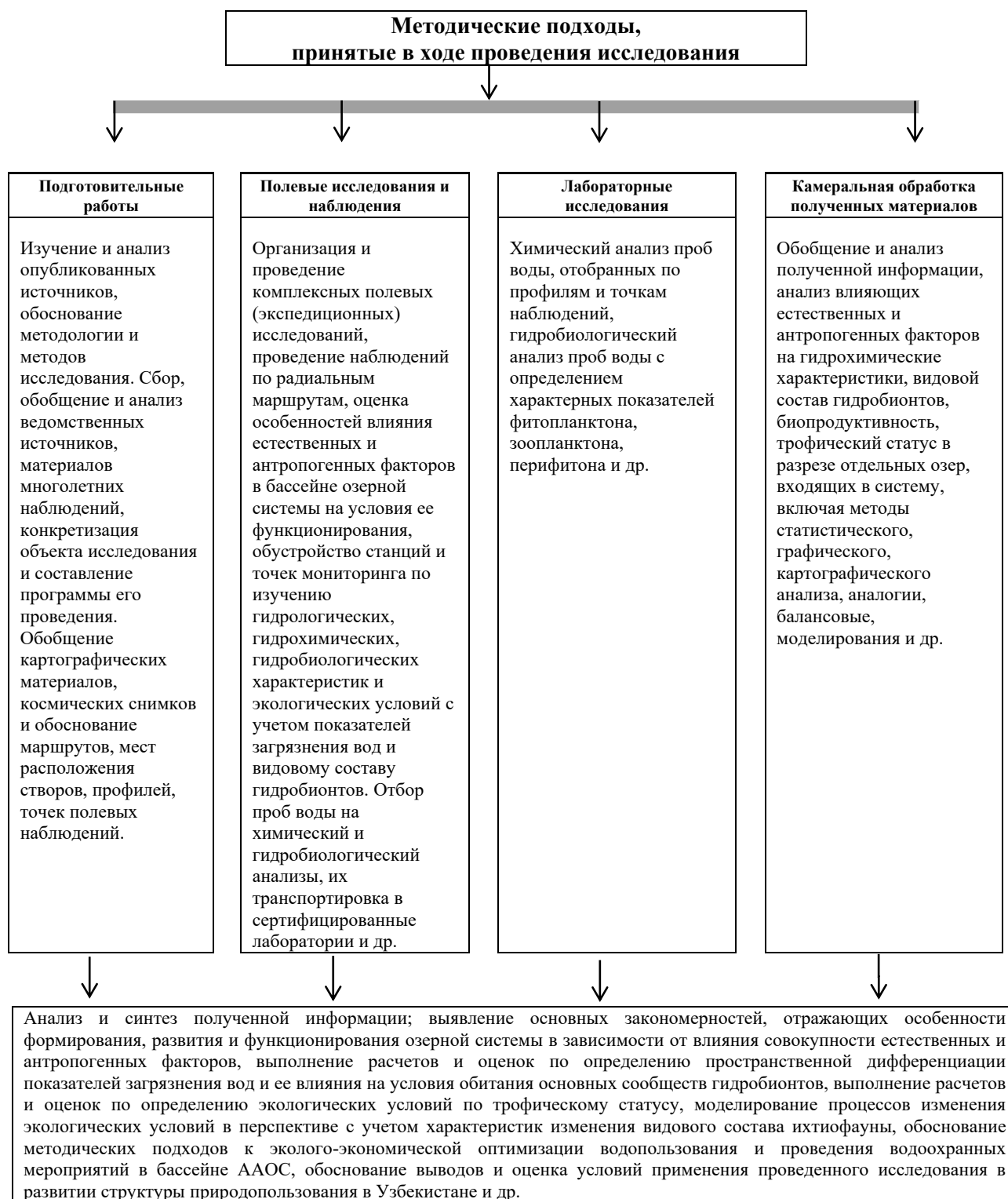


Рис. 2. Методические подходы, принятые в ходе проведения исследования

Fig. 2. Methodological approaches adopted during the study

Результаты

На основании анализа динамики изменения морфометрических характеристик и экологических условий в озерной системе со времени ее возникновения до последних лет можно выявить 2 этапа: 1) возникновение, развитие, формирование озерной чаши с наибольшими параметрами и относительно благоприятными гидрохимическими и экологическими характеристиками к 2006 г.; 2) функционирование озерной системы в условиях: существенного сокращения приходной части водного баланса после указанного года в связи с резкой ограниченностью пусков из Чардаринского водохранилища при нарастающем поступлении загрязненных стоков с орошаемых массивов; увеличения испарения с поверхности акватории озерной системы в связи с

повышением температуры воздуха; уменьшения годовой суммы атмосферных осадков; многократного превышения количества поступающих загрязненных стоков с орошаемых массивов по сравнению с объемами попусков пресной воды из указанного водохранилища.

Характеристики многолетней динамики поступления в озерную систему коллекторно-дренажных стоков с орошаемых массивов и попусков воды из Чардаринского водохранилища были подробно раскрыты в работе [4]. В данной статье представлен анализ особенностей изменения климатических условий и их влияния на водный баланс с выявлением характерных изменений, обусловивших регрессивную фазу эволюции озерных экосистем.

Климатические тренды в бассейне ААСО выявлены по осредненным значениям материалов многолетних наблюдений по 8 метеорологическим станциям и постам и проявляются в следующем. За период 1979–2023 годов среднегодовая температура воздуха повысилась на 2,3 °C – с 13,5 до 15,8 °C (рис. 3). Наиболее теплыми годами были 2021–2023 гг. (до 16,0–16,7 °C). Годовая сумма осадков снизилась на 84 мм – с 440 до 356 мм (рис. 4).

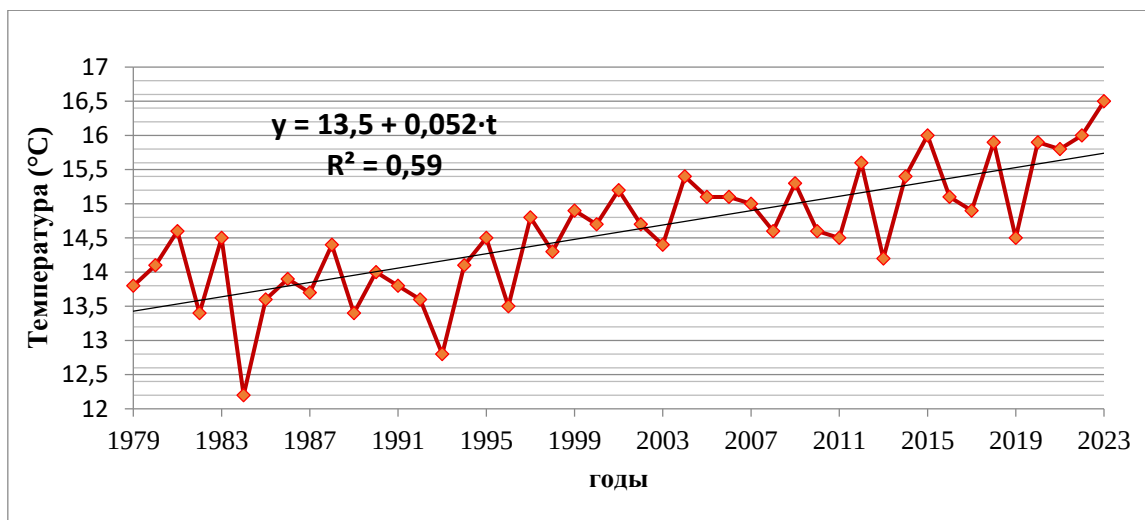


Рис. 3. Многолетняя динамика изменения среднегодовой температуры воздуха в бассейне Айдар-Арнасайской системы озер (1979–2023 гг.)

Fig. 3. Long-term dynamics of changes in the average annual air temperature in the Aydar-Arnasay lake system (1979–2023)

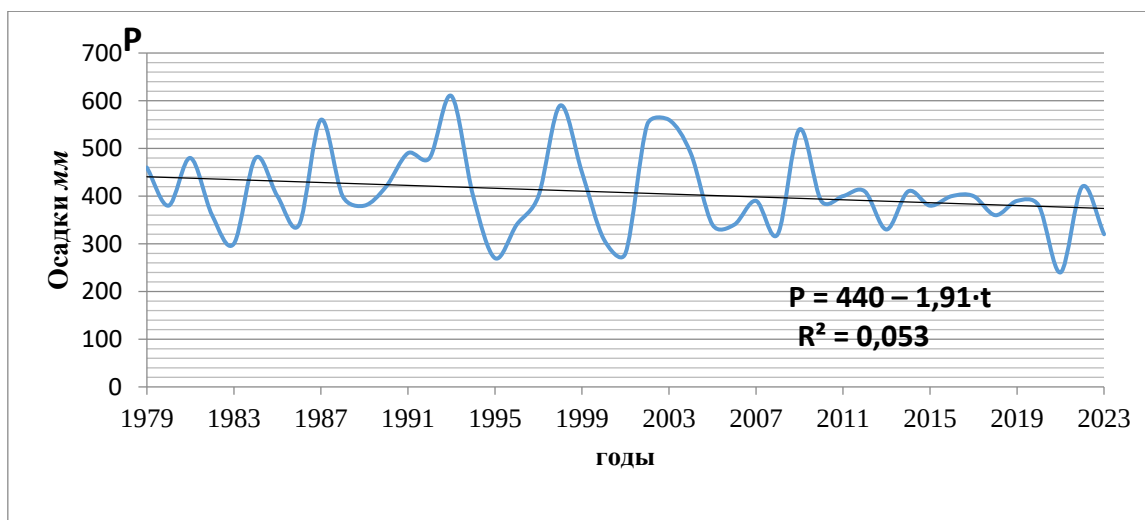


Рис. 4. Динамика годовой суммы атмосферных осадков, осредненной по метеостанциям (1979–2023 гг.)

Fig. 4. Dynamics of the annual amount of precipitation averaged by weather stations (1979–2023)

В целом, факторы, обусловленные отрицательной разницей в приходной части водного баланса, а также потеплением климата, привели к тому, что за 15 лет (2006–2021 гг.) уровень воды в озерной системе понизился на 3,12 м, объем уменьшился с 42,1 до 34,2 км³. В этих условиях преобладающее влияние коллекторно-дренажных вод проявилось в существенном увеличении концентраций загрязняющих веществ в водной среде, возникновении неблагоприятных экологических последствий в целом. Общее снижение уровня воды привело к заметному сокращению площади зеркала озерной системы; при смещении уреза воды на местах многих бывших

озерков и заливов образовались высохшие понижения с отложениями солей, отчетливо наблюдаемые в летний, осенний сезон и др. Изменение площади зеркала озерной системы в течение 2006 и 2024 гг. отражено на рис. 5.

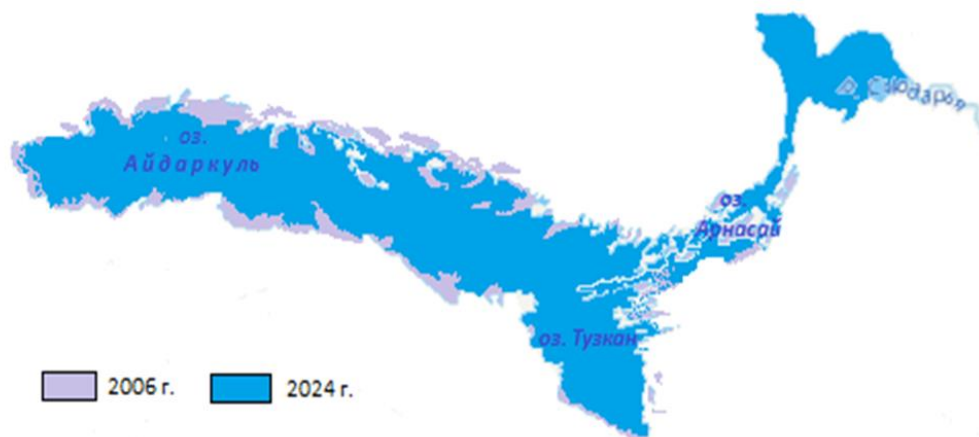


Рис. 5. Площади зеркала ААСО в 2006 и 2024 гг.

Fig. 5. Areas of the AALS surface in 2006 and 2024

Сезонные колебания уровня воды по данным за 2005–2024 гг. составляют 0,56–1,17 м. Подъем происходит в зимне-весенний период с максимумом в мае (за счет талых вод и остаточных попусков), спад продолжается летом и осенью. Минимум фиксируется в ноябре–декабре. Температурный режим типичен для региона: летом вода прогревается до 30–31 °С, зимой охлаждается до 0–1 °С; в суровые зимы (например, 2007–2008 гг.) поверхность озерной системы полностью замерзает.

Количественная оценка регрессивной фазы эволюции Айдар-Арнасайской системы озер по показателям притока и расходования воды осуществлена на основании составления водного баланса [19]. В приходной части учтены: попуски воды из Чардаринского водохранилища, расположенного на р. Сырдарья; коллекторно-дренажные стоки; атмосферные осадки, выпадающие на поверхность зеркала озерной системы и подземный приток. Расходная часть включает испарение с водной поверхности, забор воды на орошение (преимущественно из озера Арнасай) и фильтрацию в подземные горизонты.

Испарение с водной поверхности оценивалось по данным непосредственных измерений по испарителям, относящимся к сети наблюдений Узгидромета. В условиях высоких летних температур воздуха вода прогревается до 30° С и выше, годовой слой испарения при этом составляет 1300–1500 мм/год. Это соответствует ежегодным потерям объема воды до 4,0–4,7 км³.

Подземный водообмен рассчитывался по формуле Дарси (формула 1) и уточнялся с помощью балансового уравнения. Установлено, что в период с марта по июль объем грунтовых вод, поступающих в озера, увеличивается на 0,13–0,83 км³ в месяц, а с августа по февраль снижается на 0,05–0,51 км³ в месяц, что согласуется с данными [6; 16].

Общее уравнение водного баланса применительно для ААСО имеет вид:

$$S = I + R + GW_{\text{пвд}} - E - Q_{\text{отв}}, \quad (1)$$

где S – изменение объема озерных вод; I – приток воды из Чардаринского водохранилища и коллекторно-дренажных систем (км³); R – количество атмосферных осадков, выпадающих на поверхность озерной системы (км³); $GW_{\text{пвд}}$ – подземные воды; E – объем испарения (км³), $Q_{\text{отв}}$ – водозабор на орошение (оз. Арнасай) (км³). Сводные характеристики водного баланса озерной системы за 2004–2022 гг. отражены в табл. 1.

Анализ таблицы 1 показывает следующее.

Приходная часть. Как было показано ранее, с 2006 года наблюдается резкое сокращение попусков воды из Чардаринского водохранилища. Так, если они в 2004 году составляли 2865,0 млн м³, то в 2006 г. доходили лишь до 337,0 млн м³. Во времени поступление вод крайне нестабильное, изменяется от 1623,0 (2012 г.) до 0 млн м³ (2020 г.). В 2022 году оно составило 510,7 млн м³, что выше значений 2016–2018 гг., но значительно ниже средних показателей 2000-х гг. Коллекторно-дренажные воды являются основным устойчивым источником водного питания озерной системы. Их максимальный объем зафиксирован в 2020 г. (3245,5 млн м³), минимальный – в 2006 г. (1848,4 млн м³). В 2022 году поступило 2442,3 млн м³, что близко к уровню 2014–2016 гг. Атмосферные осадки колеблются от 192 до 380 млн м³ в год; в 2022 г. их объем составил 320,5 млн м³ (выше среднего).

Расходная часть. Испарение стабильно высокое – от 3900 до 4300 млн м³/год. Забор воды на орошение, осуществляемое из Арнасайского водохранилища, увеличился с 20,8 (2004 г.) до 140,2 млн м³ (2022 г.), однако его доля в общем расходе остается незначительной.

Итоговый баланс. Положительное сальдо (профицит) наблюдалось только в 2004 и 2012 гг., что характеризовалось значениями +1145,6 и +249,1 млн м³ соответственно. В обоих случаях это происходило за счет попусков большого количества водных ресурсов из Чардаринского водохранилища. В целом, начиная с 2006 года, доминирует отрицательный баланс (дефицит). Наиболее значительный дефицит зафиксирован в 2022 г. – 1034,5 млн м³, что было обусловлено малым притоком вод из р. Сырдарья и интенсивным испарением с водной поверхности озерной системы (табл. 1).

Таблица
Table

Водный баланс ААСО за 2004–2022 гг.
AALS water balance for 2004–2022

Водный баланс	Годы									
	2004	2006	2008	2010	2012	2014	2016	2018	2020	2022
Приходные воды (млн м ³)										
Сброс из Чардаринского водхр.	2865,0	337,0	956,0	840,0	1623,0	124,0	25,0	269,0	0,0	510,7
Подземные воды	41,1	46,2	44,6	45,5	45,7	45,1	43,4	43,3	42,9	43,1
Осадки	380,0	241,5	280,7	220,2	263,6	192,5	363,2	230,6	310,9	320,5
Коллекторно-дренажные воды	1789,4	1848,4	2531,5	2596,4	2640,9	2587,7	2666,6	2882,4	3245,5	2442,3
Итого	5075,5	2473,1	3812,8	3702,1	4573,2	2949,3	3098,2	3425,3	3599,3	3316,6
Расходные воды (млн м ³)										
Испарение	3909,1	4161,6	4278,2	4282,8	4224,7	4163,4	4103,2	4206,7	4089,2	4210,9
Орошение	20,8	32,4	75,2	176,4	99,4	245,8	129,0	150,5	120,9	140,2
Итого	3929,9	4194	4353,4	4459,2	4324,1	4409,2	4232,2	4357,2	4210,1	4351,1
Количество баланса	+1145,6	–1720,9	–540,6	–757,1	+249,1	–1459,9	–1134	–931,9	–610,8	–1034,5

Регрессивная фаза эволюции ААСО, наблюдаемая, как было показано ранее, с 2006 г., характеризуется устойчивым снижением уровня и уменьшением объема воды, сокращением площади зеркала и доминированием коллекторно-дренажного питания, оказывает прямое и опосредованное воздействие на экологические условия в водном объекте. Ниже рассмотрены основные экологические последствия, установленные по результатам гидрохимических съемок и гидробиологических наблюдений, проведенных нами в 2018–2024 гг.

Сокращение объема воды в озерной системе на фоне продолжающегося поступления коллекторно-дренажных вод, несущих соли, биогенные элементы и тяжелые металлы, привело к увеличению концентрации загрязняющих веществ в остаточной водной массе. Расчет комплексного показателя загрязнения (КПЗ) по методике [18] показал, что в 2023 г. его значения варьировали от 20 до 40 в различных частях акватории [4]. Наиболее высокие величины (35–40) зафиксированы в оз. Тузкан, непосредственно принимающем КДВ, а также на участках с замедленным водообменом в центральной части Айдаркуля. В соответствии с градациями, приведенными в работе [18], воды ААСО относятся к категориям «грязные» (КПЗ 20–30) и «чрезвычайно грязные» (30–40). Основной вклад в КПЗ вносят сульфаты, хлориды, соединения азота, фосфора, а также медь, цинк, хром и др. элементы, поступающие в составе коллекторно-дренажных вод с орошаемых массивов. Их концентрации многократно превышают значения ПДК загрязняющих веществ относительно водных объектов рыбохозяйственного назначения.

Следует обратить внимание на то, что поступление биогенных элементов (в первую очередь фосфора и азота) в составе неконсервативных загрязняющих веществ является причиной, обуславливающей эвтрофикацию водоемов. Особенности их влияния на трофический статус озер раскрыты в значительном количестве опубликованных работ [2; 3; 8–13; 22–23]. Оценка трофического статуса изучаемой озерной системы проводилась нами с использованием модели бюджета фосфора [23] и модифицированной диаграммы Фолленвайдера [22], которые учитывают показатели фосфорной нагрузки водоема. В данной работе величины фосфорной нагрузки (в г/(м²·год) рассчитывались по концентрациям фосфора в составе КДВ, поступающих в озерную систему, а также по удельным показателям поступления фосфора из населенных пунктов, расположенных за пределами коллекторно-дренажных систем, пастбищных угодий и др.

Общая масса поступления фосфора в водный объект (M_p) в составе коллекторно-дренажных вод за год рассчитывалась по формуле 2:

$$M_p = 31,536 \cdot 10^6 \cdot C_p \cdot Q, \quad (2)$$

где C_p – концентрация фосфора в КДВ; Q – общий расход КДВ ($m^3/сек.$); $31,536 \cdot 10^6$ – количество секунд в году.

В соответствии с положениями, отраженными в работах [2; 14; 15; 17], были также приняты следующие удельные показатели выноса общего фосфора с водосбора (в $г/год$): от одного жителя – до 530; в составе загрязнения продуктами жизнедеятельности скота (на 1000 кг живого веса): лошади – $19 \cdot 10^3$, КРС – $17 \cdot 10^3$, овцы – $20 \cdot 10^3$. В последующем рассчитывался суммарный поток фосфора в водное тело изучаемого водного объекта как (формула 3):

$$M_{\text{сум}} = M_p + M_{\text{ж}} + M_{\text{л}} + M_{\text{крс}} + M_{\text{о}}, \quad (3)$$

где $M_{\text{ж}}$ – общая масса фосфора, поступающего от жителей, проживающих в населенных пунктах вокруг озерной системы; $M_{\text{л}}$ – общая масса фосфора, поступающего в результате жизнедеятельности лошадей, содержащихся и пасущихся на прилегающей к водному объекту водосборе; $M_{\text{крс}}$ – общая масса фосфора, поступающего в результате жизнедеятельности крупного рогатого скота; $M_{\text{о}}$ – общая масса фосфора, поступающего в результате жизнедеятельности овец.

Фосфорная нагрузка определялась посредством деления суммарной массы поступившего фосфора на площадь водного объекта в m^2 . Таким образом, рассчитанная фосфорная нагрузка по озерной системе варьирует от 0,10 до 0,18 $г/(m^2 \cdot год)$. Коэффициент удержания фосфора в озерах достигает 70–90 %, что свидетельствует о высокой аккумуляции биогенов в водной толще и донных отложениях.

На основании применения модифицированной диаграммы Фолленвейдера [23] было установлено, что озера Арнасай и Айдаркуль имеют мезотрофный статус, в то время как оз. Тузкан, испытывающее наибольшую нагрузку КДВ, находится на границе перехода от мезотрофного к эвтрофному состоянию. В нем фиксируются более высокие концентрации хлорофилла «а», снижение прозрачности воды и увеличение биомассы фитопланктона, включая сине-зеленые водоросли. Эти изменения согласуются с показателями фито- и зоопланктона, что подтверждает надежность диагностики [4].

Установлено, что регрессивная фаза эволюции озерной системы сопровождается и ростом минерализации (с 5,1 до 8,0 ‰), увеличением КПЗ; проявляется она и по показателям сокращения видового состава ихтиофауны, занимающей верхнюю иерархическую ступень в пищевой цепи в экосистеме. На основе анализа материалов по рыбопромысловой статистике и данных полевых наблюдений выявлено, что за период с 2006 по 2024 г. число видов рыб в ААСО сократилось с 26 до 14. Как было показано ранее, наибольшее количество видов рыб (26) в водном объекте обитало в 2000–2006 гг., когда наблюдались более благоприятные условия для высших гидробионтов. Это было связано с наименьшими комплексными показателями загрязнения вод, обусловленными ежегодными пусками большого объема пресных вод из Чардаринского водохранилища. В 2024 году в озерной системе обитало лишь 14 видов рыб, что является прямым доказательством негативного влияния высоких показателей КПЗ на ихтиофауну и возникновения риска не восстановления их популяций в перспективе (рис. 6). Из состава ихтиофауны за последние годы исчезли такие виды, как чехонь, аральская шема, глазчатый горчак, которые были отмечены 1990–2019 гг.; полностью исчез восточный лещ, хотя в уловах 2006–2019 гг. попадались единичные особи. В настоящее время промысловая фауна состоит из 9 видов рыб, из которых 6 видов (сазан, аральский жерех, судак, змеёголов, сом, щука) являются основными промысловыми видами, 3 вида (аральская плотва, серебряный карась, красноперка) относятся к малоценным с точки зрения промысла. Следует подчеркнуть, что рыбный промысел в основном базируется на четырех видах рыб (аральская плотва, серебряный карась, сазан, судак), дающих до 96,2 % всего вылова.

Критерии, характеризующие устойчивое воспроизводство ихтиофауны на фоне возрастающего влияния антропогенных факторов, подробно рассмотрены в работах [8; 10]. В них показано, что самовосстановление популяций может происходить только в тех условиях, когда сохранившаяся численность (видовой состав) рыб составляет более 50 % от первоначального состава. Для описания общей тенденции уменьшения видового состава ихтиофауны в зависимости от влияния комплексных показателей загрязнения водной среды в данной работе была использована экспоненциальная модель, предложенная А. М. Гареевым [2] (формула 4):

$$N = N_0 \exp(-a \cdot C), \quad (4)$$

где N – число видов; C – комплексный показатель загрязнения (КПЗ); a – коэффициент редукции.

Прогнозные расчеты, выполненные нами методом экстраполяции тенденций (рис. 6), показывают, что при сохранении установившегося темпа роста загрязнения (КПЗ увеличивается примерно на 1,2 ед./год) к 2030 г. число видов рыб может снизиться до 11, а к 2040 г. – до 7. При этом в зависимости от простирающегося доверительного интервала в пределах прогнозных уровней ошибки оценок могут составить от 16,6 до 28,6 %. Ихтиофауна будет представлена преимущественно малоценными (аральская плотва, серебряный карась, красноперка) и сорными видами (горчак, востробрюшка, риногобиус, гамбузия), что приведет к утрате рыбохозяйственного и рекреационного потенциала озерной системы в целом.

Таким образом, регрессивная фаза эволюции озерной системы развивается в виде уменьшения значимости влияния основных факторов – интенсивности внешнего водообмена, средней глубины водного объекта, которые непосредственно учитываются при оценке трофического статуса, исходя из биогенной концепции [22; 23]. Увеличение количества коллекторно-дренажных вод, содержащих высокие концентрации загрязняющих

веществ с различными признаками негативного воздействия на водные экосистемы, при этом выступает как фактор, в целом усиливающий экологическое неблагополучие в исследуемом водном объекте.

Испарение, возрастающее в условиях климатического потепления, дополнительно повышает минерализацию и концентрации загрязняющих веществ. Таким образом, проявляется суммарное влияние первичных и вторичных факторов, которые в итоге привели к тому, что в озерной системе в настоящее время наблюдаются, а в перспективе будут и усиливаться процессы, формирующие неблагоприятные хозяйственно-экономические и экологические последствия.

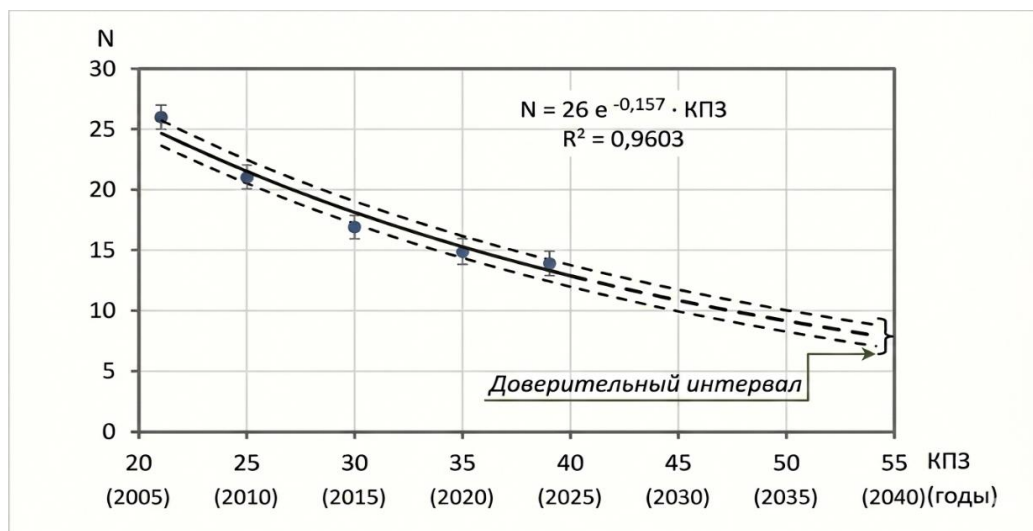


Рис. 6. Тенденция сокращения количества видов рыб по мере увеличения КИЗ (на примере оз. Тузкан)

Fig. 6. The trend of declining fish species diversity as the CPI increases (the case of Lake Tuzkan)

В совокупности эти процессы обуславливают необходимость безотлагательного проведения водоохранных мероприятий, включая увеличение экологических попусков из Чардаринского водохранилища и уменьшение количества поступления КДВ на основании оптимизации водопользования и водоохранных мероприятий, в т.ч. модернизации оросительных систем на водосборе посредством внедрения современных маловодных технологий орошения и др.

Обсуждение

Проведенное исследование позволило количественно охарактеризовать регрессивную фазу Айдар-Арнасайской системы озера как закономерный этап эволюции антропогенного водоема, установившейся после 2006 г. в результате кардинальной перестройки структуры водного баланса. Установлено, что главной причиной перехода системы к устойчивому снижению уровня, уменьшению площади и объема воды послужило резкое сокращение попусков из Чардаринского водохранилища – с 2865 млн м³ в 2004 г. до 0–500 млн м³ в 2016–2022 гг. В этих условиях доминирующим источником питания стали коллекторно-дренажные воды, доля которых в приходной части достигла 90–95 %. Однако их объем, в среднем составляющий 2,4–3,2 км³/год, оказался недостаточным для компенсации потерь воды на испарение, достигающих 4,0–4,7 км³/год (табл. 1). Это привело к формированию устойчивого отрицательного водного баланса, увеличению концентраций загрязняющих веществ и тенденции общего ухудшения экологических условий.

Важно отметить, что регрессивная фаза развивается на фоне статистически значимых климатических трендов: повышения среднегодовой температуры воздуха на 2,5 °С и снижения годовой суммы осадков на 13 % за период 1979–2023 гг. Оценочный приrost испарения (~220 мм/год) создает дополнительную потерю около 0,8 км³ воды ежегодно, что сопоставимо с объемом современных попусков из Чардаринского водохранилища. Таким образом, климатический фактор выступает не как первопричина, а как значимый усилитель регрессии, ускоряющий потери воды и увеличение концентраций загрязняющих веществ в озерной системе.

Экологические последствия, обусловленные регрессивной фазой эволюции озерной системы, проявляются в трех взаимосвязанных направлениях. Во-первых, сокращение объемов попусков пресных вод из Чардаринского водохранилища при увеличении количества поступления коллекторно-дренажных вод привело к росту концентраций загрязняющих веществ. В результате комплексный показатель загрязнения (КИЗ) достиг значений 20–40, что соответствует категориям «грязные» и «чрезвычайно грязные» воды. Во-вторых, накопление биогенных элементов (фосфора, азота) стимулирует эвтрофикацию, что особенно проявляется в оз. Тузкан. В-третьих, рост минерализации (с 5,1 до 8,0 ‰) и КИЗ вызвал резкое сокращение видового разнообразия ихтиофауны – с 26 до 14 видов за 17 лет. Экспоненциальная модель (рис. 6) при сохранении текущих тенденций изменения характеризует зависимость, отражающую адекватное описание происходящих изменений, и позволяет

прогнозировать дальнейшее снижение видового состава ихтиофауны вплоть до полной утраты рыбохозяйственной и рекреационной значимости водного объекта к 2040 г.

С практической точки зрения, замедление регрессивной фазы и смягчение экологических последствий возможно за счет принятия двух групп мер. Первая группа мер учитывает увеличение экологических попусков из Чардаринского водохранилища до объемов, обеспечивающих компенсацию потерь воды на испарение (ориентировочно не менее 1,5–2,0 км³/год в засушливые годы). Вторая включает необходимость снижения поступления загрязняющих веществ с коллекторным стоком путем модернизации оросительных систем на водосборе посредством широкомасштабного внедрения систем капельного орошения, оптимизации промывок земель, очистки коллекторных вод и др. Обоснование необходимых параметров приходных составляющих водного баланса озерной системы с учетом требований поддержания качества воды, удовлетворяющего условиям устойчивого функционирования водных экосистем, может быть достигнуто посредством проведения самостоятельных расчетов и оценок, принятия конкретных решений, направленных на оптимизацию водопользования и водоохраных мероприятий в пределах ее бассейна с учетом как экономических, так и экологических критериев. Без реализации этих мероприятий дальнейшая эволюция озерной системы будет деградировать, что приведет к утрате ее ландшафтоформирующей, экологической, рекреационной и др. значимости.

Выводы

Проведенное исследование позволило выявить, что основной причиной возникновения регрессивной фазы эволюции Айдар-Арнасайской системы озер является установление после 2006 г. устойчивого дефицита водного баланса, сформировавшегося в условиях резкого сокращения попусков воды из Чардаринского водохранилища при увеличении доли коллекторно-дренажных вод, поступающих с орошаемых массивов на водосборе. Таким образом, доминирующим источником притока стали коллекторно-дренажные воды, содержащие в своем составе высокие концентрации загрязняющих веществ консервативного и неконсервативного характера воздействия на водные организмы. В расходной части водного баланса произошло увеличение потерь воды на испарение с поверхности акватории в связи с устойчивым повышением значений среднегодовой температуры воздуха при заметном снижении количества выпадающих атмосферных осадков. Таким образом, с 2006 года по настоящее время указанные факторы обусловили снижение уровня воды в озерной системе на 3,12 м, сокращение площади зеркала с 3899 до 3702 км² (на 5,1 %), уменьшение объема воды с 42,1 до 34,2 км³ (на 18,8 %).

В целом, произошедшие изменения в характере водного питания озерной системы и химическом составе выпадающих стоков при наложении процессов, обусловленных увеличением количества потерь воды на испарение с водной поверхности, привели к тому, что концентрации многих загрязняющих веществ многократно увеличились. Это привело к росту комплексных показателей загрязнения вод, отражая формирование суммарного (аддитивного) негативного воздействия веществ на водные организмы.

Представлено, что комплексные показатели загрязнения водной среды заметно дифференцируются в пределах всей озерной системы. Это зависит от интенсивности водообмена и окислительно-восстановительных процессов, происходящих в различных частях системы (озерах Арнасай, Тузкан, Айдаркуль), притока поверхностных, подземных вод и др.

Оценка трофического статуса указанных озер, осуществленная на основании выполнения расчетов фосфорной нагрузки, показала, что озера Арнасай и Айдаркуль относятся к категории мезотрофных, в то время как оз. Тузкан находится в переходной зоне от мезотрофного к эвтрофному. Установившиеся трофические статусы подтверждаются также по показателям гидробионтов, что отражает надежность выполненных расчетов.

С учетом того, что установившийся уровень экологических условий в водоемах наиболее полно оценивается по популяционным условиям и воспроизводству высших гидробионтов в биотопах, была произведена система расчетов по оценке влияния комплексных показателей загрязнения (КПЗ) вод на видовой состав ихтиофауны. Экспоненциальная зависимость, характеризующая последовательное сокращение количества видов по мере увеличения комплексных показателей загрязнения вод в озерах, позволила выполнять и прогнозные оценки. Так, если на уровне 2006 года по материалам рыбопромысловой статистики в исследуемых озерах обитало 26 видов рыб, к 2024–2025 г. их число сократилось до 14. Прогнозная оценка, проведенная методом экстраполяции тенденций, показала, что при сохранении установившихся тенденций увеличения КПЗ на уровне 2030 г. число видов рыб может снизиться до 11, а к 2040 г. – до 7.

Установившиеся тенденции в ухудшении экологических условий в озерной системе, а также усиление рисков деградации водных экосистем в ближайшей и отдаленной перспективах обуславливают необходимость безотлагательного проведения мероприятий, направленных на минимизацию масштабов влияния орошаемых массивов и других видов хозяйственной деятельности на качество вод и экологические условия в озерной системе. Исходя из изложенного, рекомендованы мероприятия по оптимизации водопользования и проведению водоохраных мероприятий в ее бассейне с учетом значимости экономических и экологических критериев. Это позволит перевести ААСО из режима неконтролируемой регрессии в управляемое водопользование, сохранив экологические и рыбохозяйственные функции системы.

Библиографический список

1. Бузмаков С. А. Геоэкологические закономерности техногенной трансформации надземных экосистем под воздействием эксплуатации месторождений нефти: автореф. дис. ... докт. геогр. наук / Перм. гос. ун-т. Пермь, 2005. 44 с. EDN: NIJVF
2. Гареев А. М. Оптимизация водоохранных мероприятий в бассейне реки (географо-экологический аспект). СПб: Гидрометеиздат, 1995. 190 с. ISBN: 5-286-01192-6 EDN: TGLKJT
3. Гареев А. М. Охрана вод суши. Уфа: РИЦ БашГУ, 2021. 280 с.
4. Гареев А. М., Уролов С. У., Гудалов М. Р., Шевченко А. М. Айдар-Арнасайская система озер: комплексный анализ формирования, антропогенной трансформации, современного экологического состояния и перспектив устойчивого водопользования // Вестник Удмуртского университета. Сер. Биология. Науки о Земле. 2026. Т. 36, № 1. С. 27–36. DOI: 10.35634/2412-9518-2026-36-1-27-36 EDN: QFAYLU
5. Глазовская М. А. Биогеохимическая организованность экологического пространства в природных и антропогенных ландшафтах как критерий их устойчивости // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 1992. № 5. С. 5–12.
6. Горелкин Н. Е. Гидрометеорологический, гидрохимический режим и прогноз водно-солевого баланса Арнасайской озерной системы: автореф. дис. ... канд. геогр. наук / Ташкентский государственный университет. Ташкент, 1985. 164 с. DOI: 10.35634/2412-9518-2026-36-1-27-36 EDN: QFAYLU
7. Гудалов М. Влияние вод на изменение ландшафтов в Айдар-Арнасайском бассейне // Известия Географического общества Узбекистана. 2012. Т. 39. С. 15–19.
8. Дажо Р. Основы экологии. М.: Прогресс, 1975. 415 с.
9. Иванова О. А. Техногенная трансформация природной среды на территории Кизеловского угольного бассейна: экологические проблемы и пути рекультивации // Антропогенная трансформация природной среды. 2025. Т. 11, № 2. С. 49–60. DOI: 10.17072/2410-8553-2025-2-49-60 EDN: QZZSJT
10. Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды. М.: Гидрометеиздат, 1984. 560 с.
11. Кулагин А. Ю. Техногенная трансформация ландшафтов при добыче полезных ископаемых и лесная рекультивация как способ оптимизации состояния окружающей среды // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2010. № 2(26). С. 219–220. EDN: MQGCWB
12. Лукьяненко В. И. Экологические аспекты ихтиотоксикологии. М.: Россельхозиздат, 1985. 176 с.
13. Махмудова Д. Д. Динамика водных ресурсов Айдар-Арнасайской озерной системы // Водные ресурсы Центральной Азии. 2004. Т. 1, № 1. С. 127–130.
14. Методические рекомендации по выбору водоохранных мероприятий в зоне сельскохозяйственного освоения. Челябинск, 1986. 32 с.
15. Нежиховский Р. А. Экологические аспекты гидрологии // Метеорология и гидрология. 1989. № 11. С. 96–103.
16. Нурбаев Д. Д. Оценка современного состояния Арнасайских озер и задача регулирования гидрометеорологического режима на перспективу // Создание систем рационального использования поверхностных и подземных вод бассейна Аральского моря: Мат. Междунар. науч.-практ. конф. (Ташкент, 2003 г.). Ташкент: ГИДРОИНГЕО, 2003. С. 66–67.
17. Попов А. Н. Допустимый приток биогенных элементов в водоемы с замедленным и умеренным водообменом // Водное хозяйство России. 2020. № 4. С. 68–87. DOI: 10.35567/1999-4508-2020-4-5 EDN: VMGSII
18. Правила охраны поверхностных вод: утв. Госкомприроды СССР 21.02.91. М., 1991. 30 с.
19. Тайлаков А. А. Оценка природных ресурсов системы озер Айдар-Арнасай с использованием современных методов для развития экотуризма: автореф. дис. ... канд. геогр. наук / Джизак. гос. пед. ун-т. Джизак, 2022. 24 с.
20. Фурманова Т. Н., Петина М. А., Петин А. Н., Белоусова Л. И. Техногенная трансформация ландшафтов в зоне влияния активно разрабатываемых месторождений полезных ископаемых региона КМА // Успехи современного естествознания. 2016. Т. 2, № 11. С. 422–426. EDN: XCGUET
21. Чембарисов Э. И., Махмудов И. Э., Лесник Т. Ю. Гидрологический и гидрохимический режимы коллекторно-дренажных вод, впадающих в Айдар-Арнасайскую озерную систему // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2016. № 1(61). С. 191–196. EDN: VRCUIB
22. Dillon P., Rigler K. A simple method for predicting the capacity of a lake for development based on lake trophic status // Journal of the Fisheries Research Board of Canada. 1975. Vol. 32, No. 9. P. 1519–1531. DOI: 10.1139/f75-178
23. Vollenweider R. A. Input – output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology // Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie. 1975. Vol. 37, No. 1. P. 53–84. DOI: 10.1007/bf02505178 EDN: GRCMUL

References

1. Buzmakov S. A. Geoecological patterns of technogenic transformation of aboveground ecosystems under the impact of oil field exploitation: author's abstract of dissertation ... Doctor of Geographical Sciences / Perm State University. Perm, 2005. 44 p. EDN: NIJVF
2. Gareev A. M. Optimization of water protection measures in a river basin (geographical-ecological aspect). St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1995. 190 p. ISBN: 5-286-01192-6 EDN: TGLKJT
3. Gareev A. M. Protection of land waters. Ufa: RIC BashGU, 2021. 280 p.
4. Gareev A. M., Uralov S. U., Gudalov M. R., Shevchenko A. M. The Aydar-Arnasay lake system: a comprehensive analysis of formation, anthropogenic transformation, current ecological state and prospects for sustainable water use // Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences. 2026. Vol. 36, No. 1. P. 27–36. DOI: 10.35634/2412-9518-2026-36-1-27-36 EDN: QFAYLU
5. Glazovskaya M. A. Biogeochemical organization of ecological space in natural and anthropogenic landscapes as a criterion of their stability // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series. 1992. No. 5. P. 5–12.
6. Gorelkin N. E. Hydrometeorological and hydrochemical regime and forecast of water-salt balance of the Arnasay lake system: author's abstract of dissertation ... Candidate of Geographical Sciences / Tashkent State University. Tashkent, 1985. 164 p.
7. Gudalov M. Influence of water on landscape changes in the Aydar-Arnasay basin // Proceedings of the Geographical Society of Uzbekistan. 2012. Vol. 39. P. 15–19.
8. Dajoz R. Fundamentals of Ecology. Moscow: Progress, 1975. 415 p.

9. Ivanova O. A. Technogenic transformation of the natural environment in the territory of the Kizelovsky coal basin: environmental problems and reclamation ways // *Anthropogenic Transformation of the Natural Environment*. 2025. Vol. 11, No. 2. P. 49–60. DOI: 10.17072/2410-8553-2025-2-49-60 EDN: QZZSJT
10. Izrael Yu. A. Ecology and monitoring of the natural environment. Moscow: Gidrometeoizdat, 1984. 560 p.
11. Kulagin A. Yu. Technogenic transformation of landscapes during mining and forest reclamation as a way to optimize the state of the environment // *Proceedings of Orenburg State Agrarian University*. 2010. No. 2(26). P. 219–220. EDN: MQGCWB
12. Lukyanenko V. I. Ecological aspects of ichthyotoxicology. Moscow: Rosselkhozizdat, 1985. 176 p.
13. Makhmudova D. D. Dynamics of water resources of the Aydar-Arnasay lake system // *Water Resources of Central Asia*. 2004. Vol. 1, No. 1. P. 127–130.
14. Methodological recommendations for the selection of water protection measures in the zone of agricultural development. Chelyabinsk, 1986. 32 p.
15. Nezhikhovsky R. A. Ecological aspects of hydrology // *Meteorology and Hydrology*. 1989. No. 11. P. 96–103.
16. Nurbaev D. D. Assessment of the current state of the Arnasay lakes and the task of regulating the hydrometeorological regime for the future // *Creation of systems for rational use of surface and ground waters of the Aral Sea basin: Proceedings of the International Scientific-Practical Conference (Tashkent, 2003)*. Tashkent: GIDROINGEO, 2003. P. 66–67.
17. Popov A. N. Permissible input of biogenic elements into water bodies with slow and moderate water exchange // *Water Management of Russia*. 2020. No. 4. P. 68–87. DOI: 10.35567/1999-4508-2020-4-5 EDN: VMGSII
18. Rules for the protection of surface waters: approved by the USSR State Committee for Nature Protection on 21.02.91. Moscow, 1991. 30 p.
19. Taylakov A. A. Assessment of natural resources of the Aydar-Arnasay lake system using modern methods for the development of ecotourism: author's abstract of dissertation ... Candidate of Geographical Sciences / Jizzakh State Pedagogical University. Jizzakh, 2022. 24 p.
20. Furmanova T. N., Petina M. A., Petin A. N., Belousova L. I. Technogenic transformation of landscapes in the zone of influence of actively developed mineral deposits in the KMA region // *Advances in Modern Natural Science*. 2016. Vol. 2, No. 11. P. 422–426. EDN: XCGUET
21. Chembarisov E. I., Makhmudov I. E., Lesnik T. Yu. Hydrological and hydrochemical regimes of collector-drainage waters flowing into the Aydar-Arnasay lake system // *Ways to improve the efficiency of irrigated agriculture*. 2016. No. 1(61). P. 191–196. EDN: VRCUIB
22. Dillon P., Rigler K. A simple method for predicting the capacity of a lake for development based on lake trophic status // *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*. 1975. Vol. 32, No. 9. P. 1519–1531. DOI: 10.1139/f75-178
23. Vollenweider R. A. Input – output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology // *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*. 1975. Vol. 37, No. 1. P. 53–84. DOI: 10.1007/bf02505178 EDN: GRCMUL

Статья поступила в редакцию: 02.06.26, одобрена после рецензирования: 15.06.26, принята к опубликованию: 12.09.26.

The article was submitted: 02 June 2026; approved after review: 15 June 2026; accepted for publication: 12 September 2026.

Информация об авторах

Сардор Уралович Уролов

Аспирант,
Уфимский университет науки и технологий;
450074, г. Уфа, ул. З. Валиди, д. 3

Information about the authors

Sardor U. Urolov

Postgraduate Student,
Ufa University of Science and Technology;
32, Zaki Validi st., Ufa, 450074, Russia
e-mail: sardorurolov23@gmail.com

Ауфар Миннигазимович Гареев

Доктор географических наук, профессор,
Почетный академик академии наук
республики Башкортостан,
Уфимский университет науки и технологий;
450074, г. Уфа, ул. З. Валиди, д. 32

Aufar M. Gareev

Doctor of Geographical Sciences, Professor, Honorary
Academician of the Academy of Sciences of the
Republic of Bashkortostan,
Ufa University of Science and Technology;
32, Zaki Validi st., Ufa, 450074, Russia
e-mail: aufar.gareev@mail.ru

Вклад авторов

Уролов С. У. – идея, сбор и анализ материалов, создание иллюстративного материала, написание и оформление статьи.

Гареев А. М. – обработка и анализ данных, создание иллюстративного материала, редактирование и оформление статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

Sardor U. Urolov – the concept; collection and analysis of materials; creation of the illustrative material; writing and formatting of the article.

Aufar M. Gareev – data processing and analysis; creation of the illustrative material; editing and formatting of the article.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.