

ISSN 1563-034X; eISSN 2617-7358

Индекс 75880; 25880

ӘЛ-ФАРАБИ атындағы ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

# ХАБАРШЫ

Экология сериясы

---

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени АЛЬ-ФАРАБИ

# ВЕСТНИК

Серия экологическая

---

AL-FARABI KAZAKH NATIONAL UNIVERSITY

# EURASIAN JOURNAL

of Ecology

---

№1 (62)

Алматы  
«Қазақ университеті»  
2020

**Б.К. Каримов<sup>1</sup>, Н.В. Аладин<sup>2</sup>, И.С. Плотников<sup>2</sup>, Д. Кайзер<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства,

Узбекистан, г. Ташкент, e-mail: b.karimov@tiame.uz

<sup>2</sup>Зоологический институт РАН, Россия, г. Санкт-Петербург

<sup>3</sup>Университет Гамбурга, Германия, г. Гамбург

## **СОСТОЯНИЕ И ВОЗМОЖНОЕ БУДУЩЕЕ АРАЛЬСКОГО МОРЯ И ГИДРОЭКОСИСТЕМ ЮЖНОГО ПРИАРАЛЬЯ В АНТРОПОЦЕНЕ**

Историю эволюции экосистемы Аральского моря и Южного Приаралья разделяют на два периода: поздний голоцен и антропоцен. Морфологические показатели Аральского моря оставались относительно стабильными вплоть до эпохи раннего антропоцена, однако, начавшаяся деградация его экосистемы, начавшаяся в 1960-х гг., имела молниеносный и необратимый характер. Именно рост солености Аральского моря, начиная с 1960-х годов, сказался губительно на его биоразнообразии, так как в начале 1980-х годов 70% его водной поверхности и 50% водного объема еще сохранились. Следовательно, море обладало еще достаточной экологической емкостью для существования популяций живых организмов. В то же время основная проблема сохранения биоразнообразия водных экосистем и развития рыболовства в Южном Приаралье в антропоцене – это крайне нестабильный и дефицитный водный режим, который усугубляется естественными засухами, изменением климата и ухудшением качества воды. Особенно соляризация терминальных озер и водоемов приводит к уменьшению биоразнообразия и биологической продуктивности. Возможное будущее Аральского моря зависит полностью от возможного человеческого вмешательства, однако, проблематичным выглядит будущее Большого моря, которое может превратиться в гиперсоленый водоем. Для повышения устойчивости гидроэкосистем, в первую очередь, необходимо: усовершенствование управления водными ресурсами с учетом экологических требований сохранения биоразнообразия и развития рыбного хозяйства, ускоренное внедрение водосберегающих технологий орошения, интенсивной аквакультуры и озерно-товарного хозяйства, диверсификация аквакультуры путем интродукции солеустойчивых видов, усиление научно-исследовательской активности в НИИ и международного сотрудничества.

**Ключевые слова:** Аральское море, Приаралье, антропоцен, салинизация, рыбное хозяйство.

B.K. Karimov<sup>1</sup>, N.V. Aladin<sup>2</sup>, I.S. Plotnikov<sup>2</sup>, D. Kaiser<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers,

Uzbekistan, Tashkent, e-mail: b.karimov@tiame.uz

<sup>2</sup>Zoological Institute RAS, Russia, St. Petersburg

<sup>3</sup>University of Hamburg, Germany, Hamburg

## **Status and possible future of the Aral Sea and aquatic ecosystems in southern Aral Sea Region (Priaralye) in Anthropocene**

The history of the evolution of the ecosystem of the Aral Sea and the South Aral Sea is divided into two periods: the Late Holocene and the Anthropocene. The morphological indicators of the Aral Sea remained relatively stable up to the early anthropocene, however, started degradation of its ecosystem in the 1960s. had very fast and irreversible character. Above all the increase in salinity of the Aral Sea since the 1960s had a catastrophic effect on its biodiversity, since in the early 1980s 70% of its water surface and 50% of its water volume were still preserved. Consequently, the sea still possessed sufficient ecological carrying capacity for the existence of aquatic life populations. At the same time, the main problem of preserving the biodiversity of aquatic ecosystems and developing fisheries in the Southern Aral Sea region in the Anthropocene is an extremely unstable and scarce water regime, which is aggravated by natural droughts, climate change, and deterioration in water quality. Especially the salinization of terminal lakes and reservoirs leads to a decrease in biodiversity and biological productivity. The possible future of the Aral Sea depends entirely on possible human intervention, however, the future of the Large Sea looks problematic, which can turn into a hypersaline reservoir. To improve the sustainability of hydroecosystems, it is first of all necessary: improving water management taking into account envi-

ronmental requirements for the conservation of biodiversity and developing fisheries, accelerated implementation of water- saving irrigation technologies, introduction of intensive aquaculture and culture-based fisheries, diversification of aquaculture by introducing salt tolerant species, strengthening research activity in research institutes and international cooperation.

**Key words:** Aral Sea, Priaralye, anthropocene, salinization, fish economy.

Б.К. Каримов<sup>1</sup>, Н.В. Аладин<sup>2</sup>, И.С. Плотников<sup>2</sup>, Д. Кайзер<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ташкент ирригация және ауылшаруашылығын механикаландыру инженерлері институты, Өзбекстан, Ташкент қ., e-mail: b.karimov@tiiame.uz

<sup>2</sup>РФА зоологиялық институты, Ресей, Санкт-Петербург қ.

<sup>3</sup>Гамбург университеті, Германия, Гамбург қ.

Арал теңізі мен Оңтүстік Арал теңізі экожүйелерінің эволюциясының тарихы екі кезеңге бөлінеді: Кеш Голоцен және Антропоцен. Арал теңізінің морфологиялық көрсеткіштері ерте антропоценге дейін біршама тұрақты болды, алайда 1960 жылдары басталған оның экожүйесінің деградациясы басталды. Найзағай және қайтымсыз сипатқа ие болды. 60-шы жылдардан бастап Арал теңізінің тұздылығының жоғарылауы оның биоалуантүрлілігіне зиянды әсер етті, өйткені 1980 жылдардың басында оның беткі қабатының 70% және су көлемінің 50%-ы сақталды. Демек, теңіз әлі де тірі организмдердің популяциялары үшін жеткілікті экологиялық мүмкіндікке ие болды. Сонымен қатар, антропоцендегі Оңтүстік Арал өңіріндегі су экожүйелерінің биологиялық әртүрлілігін сақтау және балық шаруашылығын дамытудың басты мәселесі табиғи құрғақшылық, климаттың өзгеруі, су сапасының нашарлауы кезінде өте тұрақсыз және тапшы су режимі болып табылады. Әсіресе терминалды көлдер мен су қоймаларының тұздануы биоәртүрлілік пен биологиялық өнімділіктің төмендеуіне әкеледі. Арал теңізінің болашағы толығымен адамның араласуымен байланысты, алайда гипертұзды су қоймасына айналуы мүмкін. Ұлы теңіздің болашағы проблемалы болып көрінеді. Гидроэкожүйелердің тұрақтылығын арттыру үшін ең алдымен қажет: биологиялық әртүрлілікті сақтау және балық шаруашылығын дамыту үшін экологиялық талаптарды ескере отырып су ресурстарын басқаруды жетілдіру, суды үнемдейтін суару технологияларын жедел енгізу, қарқынды аквакультура және лакустралық-тауарлы егіншілік, аквакультураны әртараптандыру, тұзға төзімді түрлерін енгізу, ғылыми-зерттеу институттарында және халықаралық ынтымақтастықта.

**Түйін сөздер:** Арал теңізі, Арал теңізі аймағы, Антропоцен, тұздану, балық шаруашылығы.

## Введение

Воздействие антропогенной деятельности на биосферу, особенно после начала периода промышленной и зеленой революции, стало существенным настолько, что стало возможным говорить о новой эпохе взаимодействия человека и природы – антропоцене (anthropocene). В антропоцене основным фактором изменений в биосфере является «человек разумный» (*Homo sapiens*). Понятие «антропоцен» активно используется с 2000 года, после появления публикаций о том, что закончилась эпоха голоцена и началась эпоха антропоцена [1]. На 35-м Международном геологическом конгрессе, проходившем в Кейптауне в 2016 г., объявлено о начале новой геологической эпохи – антропоцена.

Многие исследователи считают началом антропоцена 1950-е годы, но в зависимости от интенсивности промышленной и зеленой революции, а также природно-климатических и экологических особенностей масштаб и скорость наступления антропоцена в различных регионах мира могли несколько различаться. Однако, в

силу глобального характера основных экологических проблем, в настоящее время эпоха антропоцена быстро приобрела планетарный характер [2]. Катастрофа экосистемы Аральского моря и сложившийся острый дефицит пресной воды в ее бассейне, где основное воздействие человека на пресные водные ресурсы происходит на сильно аридной равнинной части, убедительно свидетельствует о наступлении эпохи антропоцена. Таким образом, историю эволюции Аральского моря и Южного Приаралья можно разделить на два периода: позднем голоцене и антропоцене. Саму эпоху антропоцена мы склонны разделить на ранний – с 1950-х годов до конца XX века, когда уже появились неопровержимые признаки тенденции изменения климата; и современный – период начала активной борьбы против глобального антропогенного изменения климата в XXI веке.

## Аральское море в позднем голоцене

Аральское море в позднем голоцене представляло собой бессточное солоноватоводное

озеро, лежащее посреди обширных пустынь Центральной Азии. Арал питают 2 реки – Амударья и Сырдарья, берущие свое начало в горах Памира и Тянь-Шаня. Количество атмосферных осадков, выпадающих на поверхность этого озера, незначительно. Из-за этого уровень Арала определяется в основном балансом между притоком речной воды и испарением с поверхности.

В прошлом Аральское море было четвертым в мире по величине континентальным водоемом. На нем было развито промышленное рыболовство; море также служило важной региональной транспортной артерией. Арал был солоноватоводным водоемом со средней соленостью 10 г/л. Его населяли около 200 видов свободноживущих беспозвоночных животных и 32 вида аборигенных и интродуцированных рыб. Улов рыбы с Аральского моря и дельтовых водоемов составляли до 98% рыбодобычи в Узбекистане [3, 4].

За свою историю Аральское море пережило целый ряд регрессий и трансгрессий. Причиной большинства регрессий был частичный или даже полный поворот Амударьи под воздействием природных сил в Каспийское море. Но на уровень Арала влияли и древние земледельческие цивилизации. Их воздействие состояло не только из отбора значительного объема речной воды на орошение полей, но и периодических поворотов Амударьи в направлении Каспия. Последний такой поворот Амударьи имел место в XIII–XVI веках. Уровень Арала тогда падал более чем на 24 м. Об этом свидетельствуют как исторические записи, так и археологические памятники, а также пни саксаулов и следы древних речных русел, сохранившиеся на его дне. К середине XVII века Амударья вновь повернула (или же люди сами ее повернули) в Арал, и он восстановился.

### **Дегградация Аральского моря в антропоцене**

Морфологические показатели Аральского моря оставались относительно стабильными вплоть до эпохи раннего антропоцена, однако, начавшаяся дегградация его экосистемы, начавшаяся в 1960-х гг., имела молниеносный и необратимый характер. Быстрое высыхание Арала стало следствием крайне нерационального расширения орошаемых площадей с неэффективным использованием воды, значительно сократившего сток Амударьи и Сырдарьи. Из-за образовавшегося дефицита водного баланса площадь моря постепенно стала уменьшаться, а

соленость воды увеличиваться. В сентябре 2009 года площадь Большого Арала составляла 4922 км<sup>2</sup> (8% от 1960 г.), объем 58 км<sup>3</sup> (6% от 1960 г.), соленость Западной части достигала более 100 г/л, а Восточной части – более 200 г/л [5]. К 2018 году произошло дальнейшее снижение площади Большого Арала до 3960 км<sup>2</sup>, а объем составлял 44,3 км<sup>3</sup> [6]. Таким образом, на сегодняшний день суммарная остаточная площадь Аральского моря, включая акваторию Малого моря, составляет менее 10% от величины 1960 года.

Проведенные нами анализы показывают, что прежде всего рост солености Аральского моря, начиная с 1960-х годов, губительно сказался на его биоразнообразии и привел к краху рыболовства. Так как в начале 1980-х годов 70% его водной поверхности и 50% водного объема еще сохранились (рис.1). Следовательно, водная среда моря обладала еще достаточной экологической емкостью для существования популяций живых организмов. Основной причиной повышения солености воды явилось испарительное концентрирование солей, однако следует учесть также имевшуюся тенденцию постоянного роста минерализации воды в главных притоках моря. Например, в реке Амударья до 1980-х годов минерализация воды обычно не превышала 500 мг/л в период между май – октябрь месяцы и 800 мг/л между ноябрь – апрель [7, 8]. Однако, в последние годы эти показатели увеличились в среднем до 800 и 1600 мг/л соответственно [9]. В середине 1980-х, когда соленость моря превысила 23-25 г/л, исчезли все аборигенные виды рыб и беспозвоночных животных пресноводного и солоноватоводного происхождения (рис. 2). Из-за экономической нецелесообразности в 1983 году прекратилось промышленное рыболовство.

В результате падения уровня и пересыхания пролива Берга Арал разделился в 1987 г. на два водоема – «Малое» Аральское море на севере и «Большое» Аральское море на юге. В первый впадает Сырдарья, а во второй – Амударья. По образовавшемуся между этими озерами каналу воды первого стали стекать во второе. В 1992 г. местные власти Казахстана перекрыли его земляной дамбой, чтобы прекратить отток воды из Малого моря с целью поднять его уровень и снизить соленость, улучшив этим экологические условия. Это импровизированное сооружение несколько раз разрушалось, и его ремонтировали, пока в апреле 1999 г. его окончательно не разрушил шторм. В дальнейшем в этом месте была построена надежная Кок-Аральская земля-

ная плотина с водосбросным сооружением, для пропуска избытка воды из Малого моря (рис. 3). Строительство завершилось в августе 2005 г., и к марту следующего года уровень Малого Арала поднялся и стабилизировался [10]. Соленость Малого Арала стала снижаться, и в современном

антропоцене он вновь стал солоноватоводным. Это сделало возможным обратное вселение в Малое море естественным путем пресноводных и солоноватоводных беспозвоночных, а также промысловых пресноводных рыб, ранее исчезнувших из-за высокой солености.



Рисунок 1 – Аральское море в 1973 – 1999 гг. (Google Earth)

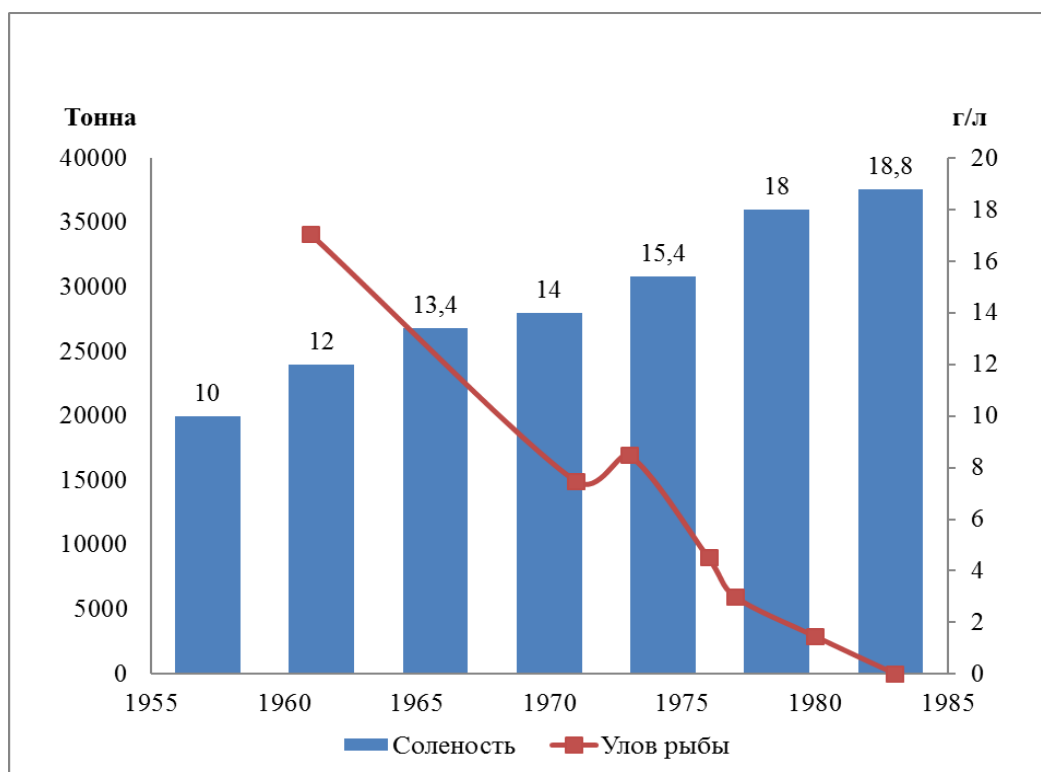


Рисунок 2 – Динамика изменения солености воды и рыбных уловов в Аральском море

Большому Аралу не столь повезло. После его отделения от Малого Арала рост солености не только продолжился, но и ускорился. Уровень его более глубокой Западной части упал на 26 м, и его соленость достигает 115 г/л и даже более [11]. Восточная часть стала мелководной с соленостью, возможно, выше 150 г/л. Она может то высыхать, то вновь наполняться водой в зависимости от годовой динамики речного стока и чередования влажных и сухих годов (рис.4). Превращение Большого моря в конце 1990-х гг. в гипергалинный водоем привело к новым и очень значительным изменениям в его фауне. Его и так уже низкое видовое разнообразие уменьшилось еще сильнее. Исчезли и еще выживавшие непромысловые мор-

ские виды рыб. Естественным путем в Большой Арал вселился рачок артемия, и сейчас активно ведется промышленная заготовка его цист. Эти яйца после соответствующей обработки используются в аквакультуре. Из этих цист вылупляются личинки рачков, являющиеся великолепным стартовым кормом. На сегодняшний день это единственный прибыльный бизнес на Большом Арале. Следует также отметить, что в последние годы на Западном Арале, со стороны плато Устюрт успешно развивается экологический туризм. Путешественников привлекает возможность увидеть деградировавшее море и останки процветавшего в былые времена рыболовного флота. Однако еще рано оценивать успехи этого бизнеса для локальной экономики.



**Рисунок 3** – Кок-Аральская земляная плотина с водосборным сооружением, вид с нижнего бьефа (сентябрь 2007 г.). Фото: И. Плотников

Целесообразно отдельно остановиться на регионе Южного Приаралья, где с 1960-х годов произошли драматические экологические процессы (рис. 5). Тенденция резкого снижения уловов рыбы с моря в раннем антропоцене, начавшегося во второй половине 1960-х гг. и сопровождавшегося уменьшением биоразнообразия не только промысловых видов рыб, но и редких и исчезающих видов [12, 13, 14], заставила рыболовов искать новые промысловые водоемы. Ускоренная переориентация рыболовства на внутренние, в основном ирригационно-сбросные озерные системы, после полного свертывания в 1983 г. промысла в Аральском море, не смогла восполнить эти потери [15]. Например, по данным Госкомстата РУз, в 1991-2004 гг. максимальный объем годовых уловов в Приаралье составил всего

лишь 2336,9 т/г. По некоторым оценкам [16], ущерб, нанесенный рыбному хозяйству Каракалпакстана, включая рыбоперерабатывающую промышленность, составил 37,57 млн. долларов США. В начале 1990-х годов в воде и других компонентах (донные отложения, растения, рыбы) большинства этих водоемов содержались повышенные концентрации загрязняющих веществ, преимущественно сельскохозяйственного происхождения [17, 18, 19]. Следовательно, объем ущерба может еще вырасти, если учесть ущерб от загрязнения гидрэкосистем. Суммарные прямые и косвенные социально-экономические потери от экологической катастрофы Южного Приаралья (включая ущерб от прекращения рыболовства на самом Арале) составляют 144,83 млн. долларов США [11].

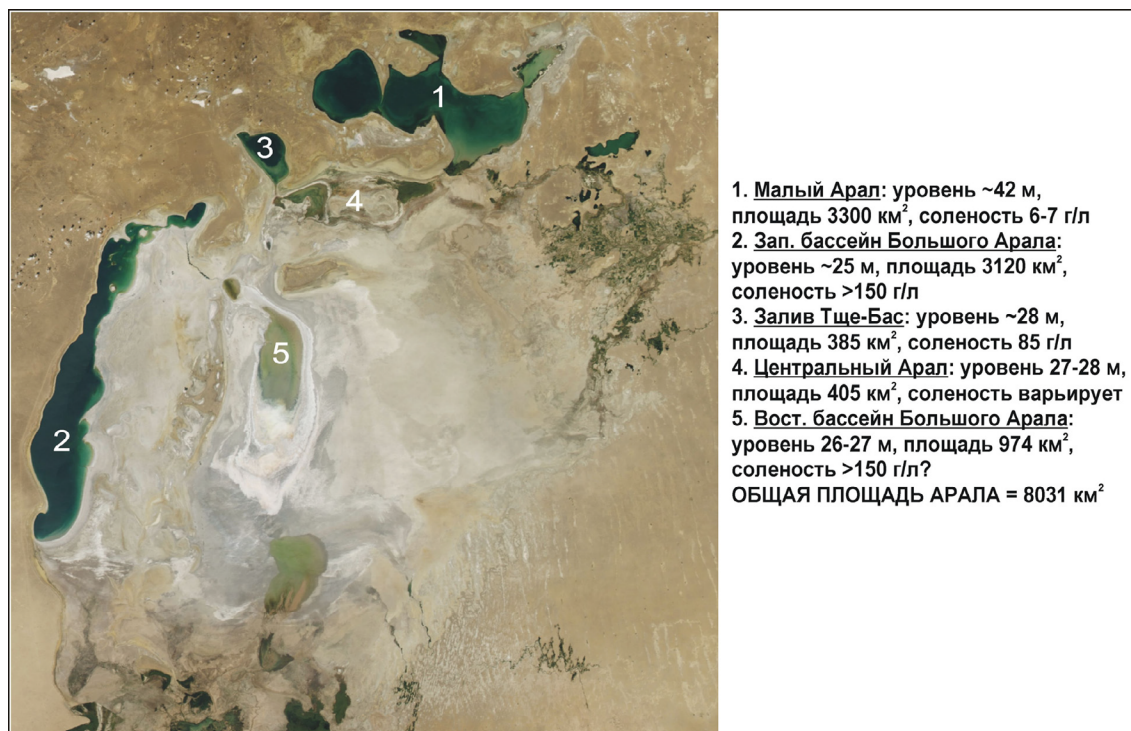


Рисунок 4 – MODIS снимок Аральского моря (22.05.2015) [10]

В период острой засухи и жестокого маловодья – 2000-2002 гг. практически все гидроэкосистемы региона высохли полностью, что привело к тотальному подрыву сырьевой базы и краху рыбного хозяйства Каракалпакстана. За эти два года оставшиеся 15-20% обмелевшие акватории озер были практически обезрыблены из-за вынужденного тотального облова рыбы и гибели ее в труднодоступных участках. Это привело в 2002г. к самому минимальному улову в истории Республики Каракалпакстан – всего лишь 130 т рыбы. Аналогичным образом, маловодье 2007-2008 гг. привело к высыханию большей части ветланда Судочье и подрыву рыбных запасов, из-за чего здесь в 2009г. и в первой половине 2010г. промысел не проводился [20].

Когда речь идет о влиянии засухи на водные экосистемы, следует учесть, что она влияет не только на количественные показатели водных ресурсов (водобеспеченность), но и на качественные характеристики воды для различных целей водопользования, на что посвящено мало исследований. Установлено, что в южных штатах США в период с 2000 по 2017 гг. в 55 из 66 мониторинговых станциях засуха приводила к сильному статистически достоверному ( $p \leq 0.05$ ) увеличению минерализации воды (медианная величина 21%) по сравнению с периодами нор-

мальной водообеспеченности [21]. В бассейне Аральского моря засухи оказывают наиболее негативное воздействие на окружающую среду именно в регионах, близких к Аральскому морю: Южное Приаралье, Каракалпакстан и Хорезм, так как здесь антропогенные потери стока реки Амударьи составляют более 90% против около 10% естественных потерь [22, 23]. Так, наши исследования в водоемах дельтовой зоны реки Амударьи в период засухи 2000-2002 гг. показали примерно 3-4-кратное увеличение минерализации воды в Муйнакском и Сарбасском (Рыбачье) водохранилищах [24]. Эти факты еще раз доказывают серьезность проблемы и меры по смягчению последствий засух должны предусматривать как доступность воды для минимальных потребностей, так и возможное снижение ее качества, прежде всего салинизацию.

В результате резкого сокращения стока реки Амударьи многие дельтовые озера исчезли. Если количество таких озер до 1960-х годов составляло около 2500, то в 1980-е годы их осталось всего лишь около 400. Проведенный анализ современного состояния водных экосистем этого региона показывает, что это крайне нестабильный и дефицитный водный режим является основной проблемой (рис. 6, 7). Экологические условия дельтовых водоемов крайне нестабиль-

ны. По данным космических дистанционных наблюдений были выявлены следующие изменения суммарной площади озер в различные по водности годы [16]:

В средний по водности 1984 г. – 7,02 тыс.га;

В многоводном 1997 г. – 12,08 тыс.га;

В маловодном 2000 г. – 2,6 тыс.га.

В последние годы наблюдались еще большие колебания площади открытой водной поверхности водоемов в дельте реки Амударьи. Так, если в 2003-2010 годы она колебалась в пределах от 70,7 до 115,2 тыс. га, то в период 2011-2014 эта величина колебалась в гораздо меньших пределах – от 20,0 до 45,1 тыс. га [11].

По самым скромным оценкам [16], достаточного водообеспечения дельтовых водоемов возможно достичь лишь при условии, что общее требование на воду всего водохозяйственного комплекса мероприятий в дельте р. Амударьи и на осушенном дне моря в объеме 5 220 млн. м<sup>3</sup>, в т.ч. 3 825 млн.м<sup>3</sup> речной воды в год будет удовлетворяться. Для его водообеспечения потребуется удвоение стока Амударьи, чего можно достичь только за счет реально осуществимого повышения эффективности орошения в ее бассейне путем внедрения водосберегающих технологий (капельное орошение, дождевание, и т.п.).

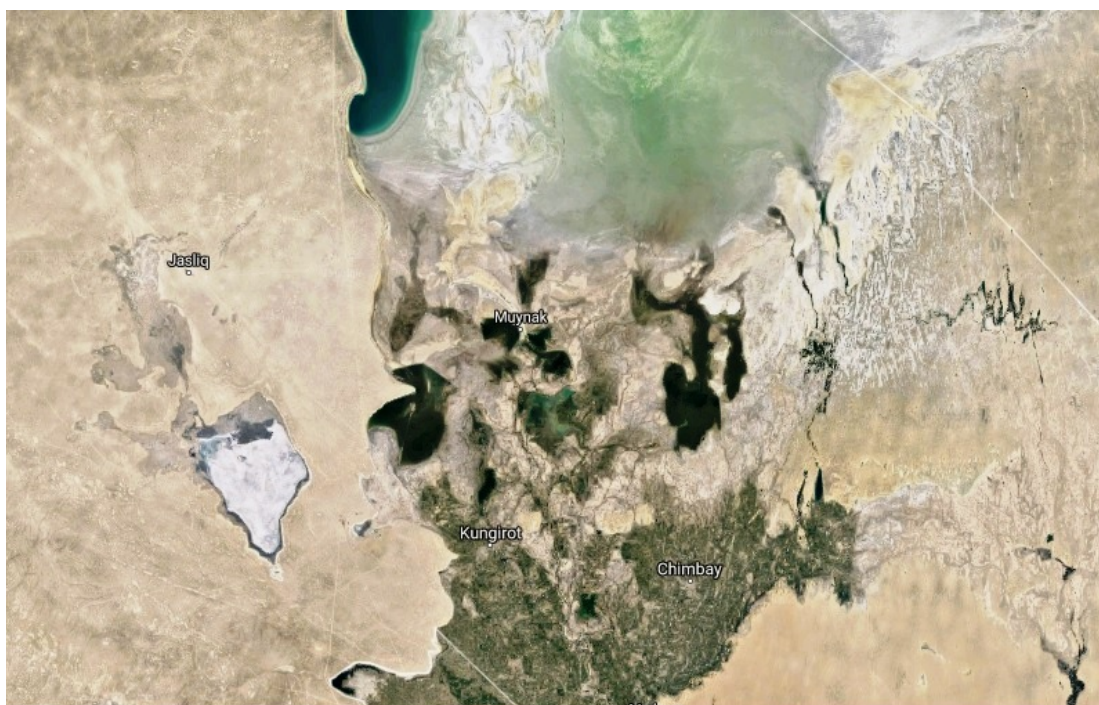


Рисунок 5 – Регион Южного Приаралья (Google Earth, 2018)

Таким образом, проведенный анализ современного состояния рыболовства в регионе низовья Амударьи показывает, что основные проблемы развития рыболовства в антропоцене – это крайне нестабильный и дефицитный водный режим, нарушающий естественные процессы нереста и формирования рыбных популяций. Салинизация воды терминальных озер и водоемов в результате прекращения водообеспечения, особенно в маловодные засухливые годы, является следующим негативным фактором, приводящим к уменьшению био-

разнообразия и биологической продуктивности [25, 26, 27, и др.]. Увеличение солености воды может привести не только к появлению различных заболеваний у человека, но и к увеличению стоимости водоподготовки для водоснабжения населения, к сокращению биоразнообразия, изменить экосистемные функции, ухудшить благосостояние населения путем снижения экосистемных услуг, получаемых от водных экосистем (например, коллапс рыболовства). Достаточно сказать, что при определении пригодности высокоминерализованной



воды реки Амударья для питьевого водоснабжения все еще в качестве норматива используется 1000 мг/л как суммарное содержание всех главных ионов. А нормативы салинизации для охраны экологического благополучия естественных экосистем вовсе отсутствуют. Дока-

зано, что при этом необходимо устанавливать допустимые нормы не только по суммарному содержанию ионов, но и для каждого иона по отдельности. Только в этом случае благополучие естественных гидроэкосистем может быть гарантировано [28, 29].



**Рисунок 6** – Резкое падение уровня воды в Междуреченском водохранилище после разрушения дамбы летом 2003 г. (стрелка показывает уровень воды 2 недели назад). Фото: Б. Каримов

Рыбное хозяйство, основанное на экстенсивном хозяйствовании с ориентацией преимущественно на естественное возобновление рыбных ресурсов в условиях дефицита воды и полной зависимости антропогенно нарушенного естественного гидрологического режима, не сможет удовлетворить потребности локального населения в рыбных продуктах. Развитие аквакультуры, т.е. разведение рыб в контролируемых условиях является потенциально основным источником, способным существенно увеличить производство рыбы в регионе низовья Амударья, вплоть до удовлетворения нужд населения в рыбопродуктах. Аквакультура способна создать много новых рабочих мест и стимулировать создание структурированного

рыбного хозяйства (производство рыбы, переработка, маркетинг, образование, исследования, экспорт и т.д.). Современные технологии позволяют уверенно получать 50-200 кг/м<sup>3</sup> воды и использовать любой тип водоемов. В зависимости от водоема можно развивать различные высокопродуктивные технологии производства рыбы: озерно-товарное хозяйство, садковую и бассейновую аквакультуру, рециркуляционные установки и т.д.

Основным ограничением на пути внедрения таких технологий в регионе Южного Приаралья является отсутствие знаний о современных разнообразных технологиях. Сегодняшний уровень финансирования научно-исследовательской и инновационной деятельности, а также экономи-

ческий потенциал существующих фермерских рыбоводческих хозяйств и рыбоперерабатывающих предприятий еще не соответствует потребностям. Наиболее эффективным методом является создание аквапарка – показательной (пилотной) фермы аквакультуры с высокой рыбопродуктивностью, высокой рентабельностью, на которой можно адаптировать несколько типов систем разведения разных видов рыб и других водных организмов. А потом аквапарк может быть использован для тренинга и мультипликации передовых технологий в различных районах региона. Например, нами доказана реальная возможность

очень перспективной диверсификации аквакультуры в регионе путем внедрения инновационной технологии выращивания пресноводных и морских креветок и крабов на базе солоноватоводных водоемов Приаралья и других регионов Узбекистана [30]. Следует также учитывать возможность налаживания производства микроводоросля дуналиелла и рачка артемии, так как соленость воды выше 55 г/л является подходящей для массового развития этого рачка, а при соленостях 80 г/л и еще выше она чувствует себя отлично и может становиться прибыльным бизнесом [31].

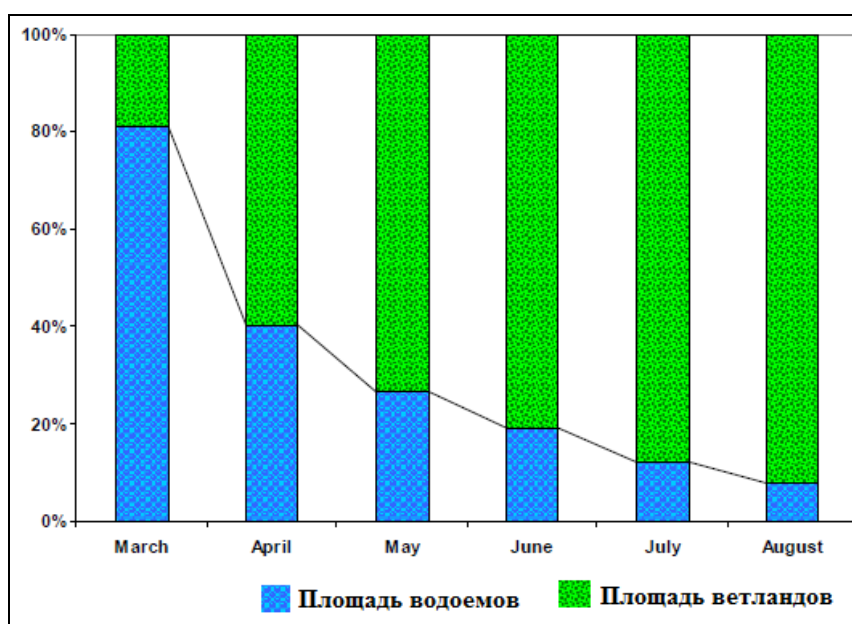


Рисунок 7 – Динамика изменения соотношения водной поверхности и ветландов в течение 2011 года (Источник: [www.cawater-info.net/aral/data/monitoring\\_amu\\_e.htm](http://www.cawater-info.net/aral/data/monitoring_amu_e.htm))

Результаты изучения современного состояния сектора рыболовства и аквакультуры и воздействие на них изменения климата, дефицита воды и салинизации, а также нормы потребления рыбных продуктов на душу населения и потребность в производстве рыбы в регионе Южного Приаралья показали, что в последние 2 года на душу населения было потреблено 2,0-2,6 кг/г рыбы, что гораздо ниже принятой медицинской нормы. Имеются практически все характерные для антропоцена серьезные антропогенные глобальные (изменение климата, рост численности населения, загрязнение природных экосистем) и локальные (дефицит воды и ухудшение ее качества, засуха) барьеры на пути развития сектора. Для повышения устойчивости к ним в пер-

вую очередь необходимо: усовершенствование управления водными ресурсами с учетом экологических требований сохранения биоразнообразия и развития рыбного хозяйства, ускоренное внедрение водосберегающих технологий орошения, интенсивной аквакультуры и озерно-товарного хозяйства, диверсификация аквакультуры путем интродукции солеустойчивых видов, усиление научно-исследовательской активности в НИИ и международного сотрудничества, позволяющих смягчить и устранить негативное воздействие изменения климата, недостатка воды и салинизации.

Таким образом, возможное будущее Приаралья зависит полностью от человеческого вмешательства. Для повышения устойчивости

гидроэкосистем в первую очередь необходимо: усовершенствование управления водопользованием и гидрологическим режимом с учетом экологических требований сохранения биоразнообразия и рыбного хозяйства, ускоренное внедрение водосберегающих технологий орошения, создание аквапарка интенсивных форм аквакультуры и озерно-товарного хозяйства, диверсификация аквакультуры путем интродукции солеустойчивых видов, усиление научно-исследовательской активности и международного сотрудничества.

### Возможное будущее Аральского моря

Какое будущее возможно у Аральского моря? Утверждение, что в пике эпохи антропоцена (в XXI веке) Арал высохнет полностью, ошибочно. Даже если сток рек Амударьи и Сырдарьи сократится до нуля (что очень маловероятно) то сохранится остаточное поступление дренажных вод с орошаемых земель, грунтовых, талых и дождевых вод [32,33]. Кроме того, со стороны Устюрта идет интенсивная подпитка Западного Арала подземным потоком более пресных вод минерализацией 40 г/л, что способствует стабилизацию уровня воды и солености [11]. В обозримом будущем возвращение Аральского моря к его состоянию на 1960 г. очень маловероятно. Это потребует восстановления речного стока до его прежнего объема и займет около 100 лет. Единственный реальный способ существенно увеличить речной сток – это очень сильно сократить потребление воды на орошение, что сделать очень непросто [32,33]. Имеется также давно известная идея подпитки Западного Арала по так называемой системе Амударья – Судочье – Аджибай, согласно которой вся вода, поступающая в дельту реки Амударьи и коллекторно-дренажный сток, перебрасываются через залив Аджибай в этот глубокий водоем. В результате этого, в Западном Арале горизонт воды устанавливается на отметках 29 – 31 м, с кратковременными минимумом в 28 м и максимумом в 32,3 м. Такой приток позволит достигнуть устойчивого тренда снижения минерализации в Западном море до  $45 \pm 16$  г/л к 2025 г [11]. Однако, никто еще всерьез не взялся за разработку ТЭО для этого возможного варианта.

Тем не менее, не все обстоит так хорошо, имеются серьезные угрозы. Согласно данным [34] в течение XX века в аридных территориях бассейна Аральского моря средняя температура воздуха повысилась на 2,8°C. Межправитель-

ственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) прогнозировала для этого региона повышение температуры воздуха к 2100 году на 3,7°C и снижение осадков [35]. Из-за глобального потепления сокращаются ледники и снежники в горах Тянь-Шаня и Памира, служащие главным источником воды для Сырдарьи и Амударьи. Со временем их ускорившееся таяние увеличит речной сток. Но, в итоге, масса льда и снега может стать настолько малой, что сток с них начнет снижаться [32,36]. Следовательно, наши предположения могут оказаться слишком оптимистичными.

Особенно проблематичным выглядит будущее Большого моря. Если сохранятся нынешние тенденции, то в течение некоторого времени уровень западной части продолжит падать, и ее площадь – сокращаться, пока, возможно, не наступит стабилизация. Вероятно, и продолжение этого процесса с неуклонным приближением к условиям, характерным для Большого Соленого озера в США, а также Мертвого моря на Ближнем Востоке и озера Урмия в Иране (соленость более 300 г/л) [32,33]. Если рост солености не остановится, то и так уже низкое биоразнообразие западной части Большого Арала будет сокращаться. В результате в его фауне может остаться только артемия, но и она исчезнет, когда соленость приблизится к 350 г/л. Следует также особо отметить, что на возможное будущее Большого Аральского моря влияют и интенсивно ведущиеся разработка и освоение нефтегазовых месторождений на его обнажившемся дне.

**Конфликт интересов:** Все авторы прочитали и ознакомлены с содержанием статьи и не имеют конфликта интересов.

*Данная работа была поддержана Государственным заданием Российской Федерации "АААА-А19-119020690091-0 – «Исследования биологического разнообразия и механизмов воздействия антропогенных и естественных факторов на структурно-функциональную организацию экосистем континентальных водоемов. Систематизация биоразнообразия солёных озёр и неполносолёных внутренних морей в зоне критической солёности, изучение роли солоноватоводных видов в экосистемах» и научно-исследовательским проектом Ташкентского института инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства (ТИИИСХ): «Разработка научных основ устойчивого управления и охраны водных ресурсов в условиях влияния изменения климата».*

### Литература

1. Crutzen P.J., Stoermer E.F. The Anthropocene. // *IGBP Newsletter*. – 2000. – Vol. 41. – P. 17-18.
2. Bhaduri A., Bogárdi J., Leentvaar J., Marx S., et al. The Global Water System in the Anthropocene: Challenges for Science and Governance. – Springer, 2014. – 436p.
3. Барханскова Г.М., Павловская Л.П., Османов С.О., Реймов Р., Седов В.В. Водоемы низовьев Амударьи. – Нукус: Изд-во КГИ, 1963. – 110с.
4. Плотников И.С. Многолетние изменения фауны свободноживущих водных беспозвоночных Аральского моря. – СПб: ЗИН РАН, 2016. – 168с.
5. Micklin P. Chapter 15. Efforts to Revive the Aral Sea. / Micklin P., Aladin N., Plotnikov I. (Eds). *The Aral Sea: The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great lake*. – Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag 2014. – P. 361–405.
6. НИЦ МКВК. Основные морфометрические характеристики Аральского моря (1911-2018), 2018. [www.cawater-info.net](http://www.cawater-info.net).
7. Рубинова Ф.Э. Изменение стока реки Амударьи под влиянием водных мелиораций в ее бассейне. Труды САНИГМИ. – 1985. – № 106(187) – 115с.
8. Рубинова Ф.Э. Влияние водных мелиораций на сток и гидрохимический режим рек бассейна Аральского моря. – 1987. – № 124(205). – 159с.
9. Karimov B.K., Matthies M., Talskikh V., Plotsen M.A., Karimov E.B. Salinization of River Waters and Suitability of Electric Conductivity Value for Saving Freshwater from Salts in Aral Sea Basin // *Asian Journal of Water, Environment and Pollution* – 2019. – Vol. 16, no. 3. – P. 109-114. DOI 10.3233/AJW190039.
10. Aladin N., Chida T., Cretaux J.F., et al. Current status of lake Aral – challenges and future opportunities. In: *Lake Ecosystem Health and Its Resilience: Diversity and Risks of Extinction. Proceedings of the 16th World Lake Conference, At Bali, Indonesia, 2017*. – P. 448-457.
11. Аральское море и Приаралье [Текст] / под общ. ред. проф. В. А. Духовного [и др.]. – Ташкент: Baktria press, 2017. – 120 с.
12. Тлеуов Р.Т. Новый режим Арала и его влияние на ихтиофауну. – Ташкент: Изд-во Фан., 1981. – 190с.
13. Glantz M.H. Aral Sea Basin: a sea dies; a sea also rises. // *Ambio: A journal of the Human Environment*. – 2007. – Vol.34, no.4. – P.323-328.
14. Gozlan R.E., Karimov B.K., Zadereev E., Kuznetsova D., Brucet S. Status, trends, and future dynamics of freshwater ecosystems in Europe and Central Asia. // *Inland Waters* – 2019. – Vol. 9, no.1. – P. 78-94. DOI: 10.1080/20442041.2018.1510271.
15. Kamilov B., Karimov B., Keyser D. The modern state of fisheries in the Republic of Uzbekistan and its perspectives // *World Aquaculture Magazine*. – 2004. – Vol.35, no 1. – P. 8-14.
16. Оценка социально-экономических последствий экологического бедствия – усыхания Аральского моря. Заключительный отчет по Южному Приаралью. Проект ИНТАС-РФФИ-1733 при участии проекта НАТО SFP №974357. Вена-Москва-Амерсфурд-Ташкент, 2001. – 123с.
17. Pavlovskaya L.P. Fishery in the lower Amu-darya under the impact of irrigated agriculture // *FAO fisheries circular*, No. 894. – Rome, FAO, 1995. – P.42-57.
18. Karimov B.K., Razakov R.M. The evaluation of toxicological situation on example of Central Asian region. The fundamentals of water protection. – Kharkov, 1990. – P. 26-94.
19. Thorpe A., Whitmarsh D., Drakeford B., et al. Feasibility of restocking and culture-based fisheries in Central Asia // *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*. No. 565. – Ankara, FAO, 2011. – 120p.
20. Жолдасова И.М. Состояние и тенденции развития рыбного хозяйства Каракалпакстана. В кн.: *Материалы республиканской научной конференции «Актуальные проблемы изучения и сохранения животного мира Узбекистана»*, Ташкент, 2011. – С. 54-55.
21. Jones E., van Vliet M. Drought impacts on river salinity in the southern US: Implications for water scarcity // *Science of The Total Environment*. – 2018. – 644. – P. 844-853.
22. Wegerich K. Natural drought or human made water scarcity in Uzbekistan // *Central Asia and the Caucasus*. – 2002. – Vol. 2(14). – P. 154-162.
23. Fedorov Y.A., Kulmatov R.A., Rubinova F. The Amudarya, in a water quality assessment the former Soviet Union. A Water Quality Assessment the Former Soviet Union. London and New York: E&FN Spon., 1998. – P. 413-45.
24. Karimov B., Lieth H., Kurambaeva M., Matsapaeva I. The problems of fishermen in the southern Aral Sea region // *Mitigation and adaptation strategies for global change*. – 2005. – Vol. 10, no. 1. – P. 87-103.
25. Коновалов П.М. Опыты по изучению влияния солености на развитие акры воблы, леща и сазана. В *Материалах по ихтиофауне и режиму вод бассейна Аральского моря*. М.: Изд-во МОИП. – 1950. – С. 70-82.
26. Karimov B., Keyser D. The effect of salt composition on the salinity tolerance of mirror carp (*Cyprinus carpio* L.) during early ontogeny // *Archive Fish. Mar. Res.* – 1998. – Vol. 46, no.3. – P. 225-239.
27. Velasco J., Gutiérrez-Cánovas C., Botella-Cruz M., et al. Effects of salinity changes on aquatic organisms in a multiple stressor context // *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. – 2018. – Vol. 374(1764). – 20180011. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2018.0011>.
28. Cañedo-Argüelles M., Kefford B.J., Piscart C., Prat N., Schäfer R.B., Schulz C.J. Salinisation of rivers: an urgent ecological issue // *Environmental pollution*. – 2013. – Vol. 173. – P. 157-67.
29. Cañedo-Argüelles M., Hawkins C.P., Kefford B.J., et al. Saving freshwater from salts // *Science*. – 2016. – Vol. 351(6276). – P. 914-91. DOI: 10.1126/science.aad3488.

30. Aladin N., Keyser D., Plotnikov I., Karimov B. Distribution of Crayfish (Crustacea) in the Zarafshan river basin and their suitability for aquaculture. In: Proceedings of the International Conference on integrated innovative development of Zarafshan region: Achievements, challenges and prospects, Navoi, Uzbekistan, 2017. – P. 262-268.
31. Anufrieva E., Shadrin N. The long-term changes in plankton composition: Is Bay Sivash transforming back into one of the world's largest habitats of *Artemia* sp. (Crustacea, Anostraca)? // Aquaculture Research. – 2019. <https://doi.org/10.1111/are.14381>.
32. Micklin P. Chapter 8. Irrigation in the Aral Sea Basin. Micklin P., Aladin N., Plotnikov I. (Eds). The Aral Sea: The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great lake. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014a. – P. 207–233.
33. Micklin P. The Future Aral Sea: hope and despair. // Environmental Earth Science. – 2016. -Vol. 75, No. 9. – P. 1–15.
34. Environmental Atlas of Uzbekistan (EAU), Statcomlandgeodescadastre, Tashkent, 2008. – 63c.
35. IPCC 2007: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. [https://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_ipcc\\_fourth\\_assessment\\_report\\_wg2\\_report\\_impacts\\_adaptation\\_and\\_vulnerability.htm](https://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg2_report_impacts_adaptation_and_vulnerability.htm). – 2018.
36. Lioubimtseva E. Chapter 17. Impact of Climate Change on the Aral Sea and Its Basin. Micklin P., Aladin N., Plotnikov I. (Eds). The Aral Sea: The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great lake. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. – P. 405–427.

### References

1. Crutzen, P.J., Stoermer, E.F. “The Anthropocene.” IGBP Newsletter 41 (2000): 17-18.
2. Bhaduri, A., Bogárdi, J., Leentvaar, J., and Marx S. eds. The Global Water System in the Anthropocene: Challenges for Science and Governance. Springer, 2014.
3. Barkhanskova, G.M., Pavlovskaya, L.P., Osmanov, S.O., Reimov, R., Sedov, B.B. Vodoyomi nizovev Amudari. [Water bodies of the Amudarya river downstream.]. Nukus: Izdatelstvo KGU, 1963. (In Russian).
4. Plotnikov, I.S. Mnogoletniye izmeneniya fauny svobodnozhivushchikh vodnykh bespozvonochnykh Aral'skogo morya. [Long-term changes in the fauna of free-living aquatic invertebrates of the Aral Sea]. SPb: ZIN RAN, 2016. (In Russian).
5. Micklin, P. Chapter 15. Efforts to Revive the Aral Sea. Micklin P., Aladin N., Plotnikov I. (Eds). The Aral Sea: The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great lake. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014.
6. NITS MKVK. Osnovnyye morfometricheskiye kharakteristiki Aral'skogo moray. [SIC ICWC. The main morphometric characteristics of the Aral Sea (1911-2018)], 2018. [www.cawater-info.net](http://www.cawater-info.net). (In Russian).
7. Rubinova, F.E. “Izmeneniye stoka reki Amudar'i pod vliyaniem vodnykh melioratsiy v yeye basseyne. [Discharge fluctuations of river Amudarya under impact of water melioration in its basin].” Trudii SANIGMI, no. 106 (187) (1985): 115. (In Russian).
8. Rubinova, F.E. “Vliyaniye vodnykh melioratsiy na stok i gidrokhimicheskiy rezhim rek basseyna Aral'skogo morya. [Impact of water melioration on discharge and hydrochemical regime of rivers in the Aral Sea Basin].” Trudii SANIGMI, no. 124 (205) (1987): 159. (In Russian).
9. Karimov, B.K., Matthies, M., Talskikh, V., Plotsen, M.A. and Karimov, E.B. “Salinization of River Waters and Suitability of Electric Conductivity Value for Saving Freshwater from Salts in Aral Sea Basin.” Asian Journal of Water, Environment and Pollution 16, no. 3 (2019): 109-114. DOI 10.3233/AJW190039.
10. Aladin, N., Chida, T., Cretaux, J.F., et al. Current status of lake Aral – challenges and future opportunities. In: Lake Ecosystem Health and Its Resilience: Diversity and Risks of Extinction. Proceedings of the 16th World Lake Conference, At Bali, Indonesia, 2017.
11. Aral'skoye more i Priaral'ye / pod obshch. red. prof. V. A. Dukhovnogo (i dr.). [The Aral Sea and Priaralye [text] / Edited by Prof. Dukhovny (et al.). Baktria press, 2017. (In Russian).
12. Tleuov, R.T. Noviy rezhim Arala i yego vliyaniye na ikhtiofaunu. [The new regime of the Aral Sea and its influence on the ichthyofauna]. Tashkent: Izdatel'stvo FAN, 1981. (In Russian).
13. Glantz, M.H. “Aral Sea Basin: a sea dies, a sea also rises.” *Ambio: A journal of the Human Environment*. 34, no.4. (2007): 323-328.
14. Gozlan, R.E., Karimov, B.K., Zadereev, E., Kuznetsova, D., Brucet, S. “Status, trends, and future dynamics of freshwater ecosystems in Europe and Central Asia.” *Inland Waters* 9, no.1. (2019): 78-94. DOI: 10.1080/20442041.2018.1510271.
15. Kamilov, B., Karimov, B., Keyser, D. “The modern state of fisheries in the Republic of Uzbekistan and its perspectives.” *World Aquaculture Magazine* 35, no 1. (2004): 8-14.
16. Otsenka sotsial'no-ekonomicheskikh posledstviy ekologicheskogo bedstviya – usykhaniya Aral'skogo morya. Zaklyuchitel'nyy otchet po Yuzhnomu Priaral'yu. Projekt INTAS-RFFI-1733 pri uchastii proyekta NATO SFP №974357. [Assessment of the socio-economic consequences of environmental disaster – the drying up of the Aral Sea. Final report on the South Aral Sea region. The INTAS-RFBR-1733 project with the participation of NATO SFP project No. 974357. Vienna-Moscow-Amersfurd-Tashkent, August], Vena-Moskva-Amersfurd-Tashkent, 2001.
17. Pavlovskaya, L.P. “Fishery in the lower Amu-darya under the impact of irrigated agriculture.” FAO fisheries circular, No. 894, Rome, FAO, 1995.
18. Karimov, B.K., Razakov, R.M. Otsenka toksikologicheskoy situatsii na primere Sredneaziatskogo regiona. [The evaluation of toxicological situation on example of Central Asian region]. The fundamentals of water protection. Kharkov, 1990. (In Russian).
19. Thorpe, A., Whitmarsh, D., Drakeford, B., Reid, C., Karimov, B., Timirkhanov, S., Satybekov, K., Van Anrooy, R. Feasibility of restocking and culture-based fisheries in Central Asia. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper. No. 565. Ankara, FAO, 2011.
20. Zholdasova, I.M. Sostoyaniye i tendentsii razvitiya rybnogo khozyaystva Karakalpakstana. V kn.: Materialy respublikanskoj nauchnoy konferentsii «Aktual'nyye problemy izucheniya i sokhraneniya zhivotnogo mira Uzbekistana».

[Zholdasova I.M. Status and development trends of fisheries of Karakalpakstan. In the book: Materials of the Republican Scientific Conference "Actual Problems of the Study and Preservation of the Fauna of Uzbekistan", Tashkent]. Tashkent, 2011. (In Russian).

21. Jones, E., van Vliet, M. "Drought impacts on river salinity in the southern US: Implications for water scarcity." *Science of The Total Environment* 644 (2018): 844-853.

22. Wegerich, K. "Natural drought or human made water scarcity in Uzbekistan." *Central Asia and the Caucasus.*, no 2(14) (2002): 154-162.

23. Fedorov, Y.A., Kulmatov, R.A., Rubinova, F. *The Amudarya, in a water quality assessment the former Soviet Union. A Water Quality Assessment the Former Soviet Union*, E&FN Spon, London and New York., 1998.

24. Karimov, B., Lieth, H., Kurambaeva, M., Matsapaeva, I. "The problems of fishermen in the southern Aral Sea region." *Mitigation and adaptation strategies for global change*. 10, no.1 (2005): P. 87-103.

25. Kononov, P.M. *Opyty po izucheniyu vliyaniya solenosti na razvitiye akry vobly, leshcha i sazana. V Materialakh po ikhtiofaune i rezhimu vod basseyna Aral'skogo morya.* [Experiments to study the effect of salinity on the development of acres of roach, bream and carp. In the Materials on the ichthyofauna and water regime of the Aral Sea basin. M., publishing house MOIP] M.: Izd-vo MOIP, 1950. (In Russian).

26. Karimov, B. and Keyser, D. "The effect of salt composition on the salinity tolerance of mirror carp (*Cyprinus carpio* L.) during early ontogeny." *Archive Fish. Mar. Res.* 46, no.3 (1998): 225-239.

27. Velasco, J., Gutiérrez-Cánovas, C., Botella-Cruz, M., et al. "Effects of salinity changes on aquatic organisms in a multiple stressor context." *Philosophical Transactions of the Royal Society B.* 374(1764) (2018): 20180011. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2018.0011>.

28. Cañedo-Argüelles, M., Kefford, B.J., Piscart, C., Prat, N., Schäfer, R.B., Schulz, C.J. „Salinisation of rivers: an urgent ecological issue." *Environmental pollution.* 173 (2013): 157-67.

29. Cañedo-Argüelles, M., Hawkins, C.P., Kefford, B.J., et al. "Saving freshwater from salts." *Science* 351(6276) (2016): 914-916. DOI: 10.1126/science.aad3488.

30. Aladin, N., Keyser, D., Plotnikov, I., Karimov, B. *Distribution of Crayfish (Crustacea) in the Zarafshan river basin and their suitability for aquaculture.* In: *Proceedings of the International Conference on integrated innovative development of Zarafshan region: Achievements, challenges and prospects.* Navoi, Uzbekistan, 2017.

31. Anufrieva, E., Shadrin, N. "The long-term changes in plankton composition: Is Bay Sivash transforming back into one of the world's largest habitats of *Artemia* sp. (Crustacea, Anostraca)?" *Aquaculture Research.* (2019). <https://doi.org/10.1111/are.14381>.

32. Micklin, P. Chapter 8. *Irrigation in the Aral Sea Basin.* Micklin P., Aladin N., Plotnikov I. (Eds). *The Aral Sea: The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great lake.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014.

33. Micklin, P. "The Future Aral Sea: hope and despair." *Environmental Earth Science.* 75, no. 9 (2016): 1–15.

34. *Environmental Atlas of Uzbekistan (EAU).* Statcomlandgeodescadastre, Tashkent, 2008.

35. IPCC 2007: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability.* [https://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_ipcc\\_fourth\\_assessment\\_report\\_wg2\\_report\\_impacts\\_adaptation\\_and\\_vulnerability.htm](https://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg2_report_impacts_adaptation_and_vulnerability.htm), 2018.

36. Lioubimtseva, E. Chapter 17. *Impact of Climate Change on the Aral Sea and Its Basin.* Micklin P., Aladin N., Plotnikov I. (Eds). *The Aral Sea: The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great lake.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014.