

## ИЗМЕНЕНИЕ УРОВНЯ ВОДЫ В СИСТЕМЕ ОЗЕР АЙДАРКУЛЬ–ТУЗКАН (ВОСТОЧНОЕ ПРИАРАЛЬЕ) В XXI В.

М.Г. Гречушникова<sup>1</sup>, А.В. Фролов<sup>2</sup>, Д.Н. Айбулатов<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> *Московской государственной университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши*

<sup>1,2</sup> *Институт водных проблем РАН, лаборатория глобальной гидрологии*

<sup>1</sup> *Вед. науч. сотр., канд. геогр. наук, ст. науч. сотр. (ИВП РАН); e-mail: allavis@mail.ru*

<sup>2</sup> *Вед. науч. сотр., докт. техн. наук; e-mail: anatolyfrolov@yandex.ru*

<sup>3</sup> *Науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: gidroden@mail.ru*

Работа посвящена оценке возможных изменений уровня режима одного из крупнейших водных объектов Средней Азии. Айдар-Арнасайская система озер имеет антропогенное происхождение, формируясь притоком коллекторно-дренажных вод с орошаемых к востоку от нее земельных массивов. Периодические сбросы пресной водой из Шардаринского водохранилища в прошлом приводили к трансгрессии уровня воды в озерной системе. Отсечение плотиной Арнасайских озер и прогнозируемое отсутствие притока пресной воды ставит задачу оценки изменения уровня воды в оставшейся системе Айдаркуль–Тузкан с учетом различных вариантов объема притока коллекторно-дренажных вод. Задача решалась на основе имитационного моделирования стохастического уравнения водного баланса озерной системы. При сохранении современного объема годового притока в перспективе равновесный уровень воды понизится от современной отметки 245 м абс до отметки около 239 м абс. При увеличении среднего притока на 0,5 км<sup>3</sup>/год колебания уровня будут происходить относительно равновесной отметки 243 м. При уменьшении среднего притока на ту же величину равновесная отметка понизится до 236 м абс.

**Ключевые слова:** водный баланс, осадки, испарение, коллекторно-дренажные воды, моделирование

### ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное и экстенсивное развитие орошения сельскохозяйственных земель на аридных территориях бывшего СССР, в частности, в бассейне Аральского моря, привело к совершенно новому явлению – формированию водоемов-накопителей дренажного стока. Деятельность человека приводит не только к деградации природных водоемов, например Аральского моря, Мертвого моря, Большого соленого озера, озера Урмие, но и к образованию водоемов нового типа вследствие перераспределения водных ресурсов рек, расположенных в соответствующих водосборных бассейнах. Возникли практические задачи прогноза уровня и солевого режима водоемов-накопителей (например, [Озеро Сарыкамыш... , 1991; Санин и др., 1991]). В данной статье рассматривается построение сценарной оценки (проекции) уровня режима бессточного озера-накопителя Айдаркуль–Тузкан в бассейне р. Сырдарья. Основные причины современных изменений уровня воды – сезонные и межгодовые изменения составляющих водного баланса: испарения, атмосферных осадков, притока коллекторно-дренажных вод и сбросов из Верхне-Арнасайского водохранилища.

Выбор способа прогноза изменений уровня определяется поставленной задачей, заблаговре-

менностью прогноза и особенностями самого процесса. Сущность вопроса состоит в расчете уровня воды при известных батиметрических кривых по изменению результирующей водного баланса, которая определяется соотношением приходных и расходных составляющих. Для их определения на перспективу возможно использовать данные климатических прогнозов сумм осадков, температуры воздуха и скорости ветра. Сложность заключается в том, что для расчета слоя испарения необходимы значения температуры поверхности воды водоема. Для точного соответствия ее значений ожидаемым климатическим изменениям необходимо привлекать модели, воспроизводящие гидрологический режим водоемов. То есть необходимо иметь модель, откалиброванную для водоема по результатам диагностического моделирования, для чего необходимы данные измерений. Так, сценарии возможных многолетних изменений гидрологического режима Ладожского и Онежского озер были выполнены с использованием гидрологических моделей и моделей общей циркуляции атмосферы и океана [Rukhovets, Filatov, 2010]. Имеется опыт прогноза многолетних изменений уровня Великих американских озер с использованием климатических и гидрологических моделей, например в [Angel, Kunkel, 2009]. Этот же

способ был успешно применен в ряде работ, посвященных прогнозам изменения режима водохранилищ, например [Гречушникова, 2014].

Для оценки будущих многолетних колебаний уровней водоемов используются модели различных видов. Такие модели могут быть чисто статистическими, основанными исключительно на основании статистических свойств рядов уровней без учета физического механизма моделируемого процесса в явном виде. Для построения таких моделей используются методы, изложенные во многих монографиях [Бокс, Дженкинс, 1974; Привальский и др., 1992; Privalsky, 2020]. Применяются также методы, основанные на коррелятивной связи между колебаниями уровней водоемов и некоторыми геофизическими, метеорологическими и гелиофизическими процессами, и методы, использующие так называемую «скрытую периодичность» процессов. Характерной особенностью перечисленных методов является явное (или неявное) принятие предположения о стационарности колебаний уровней водоемов.

Применительно к поставленной задаче оценки уровня режима озера-накопителя Айдаркуль–Тузкан, оставшегося после новейших гидротехнических преобразований, колебания уровня этого озера на перспективу, вследствие изъятий из притока в озеро воды Сырдарьи, имеют нестационарный характер. В этом случае необходимо рассчитать ансамбль возможных реализаций хода уровня озера, позволяющих получить оценки зависящих от времени математического ожидания (среднего по ансамблю реализаций) и дисперсии уровня. Для получения ансамбля этих реализаций естественно использовать динамико-стохастическую модель, по сути, представляющую собой водобалансовую модель со стохастическими компонентами водного баланса озера.

В рамках динамико-стохастического подхода многолетние колебания уровней водоемов рассматриваются как выходной процесс динамической системы, на вход которой поступают стохастические процессы – основные составляющие водного баланса водоема: поверхностный и подземный приток, осадки и испарение. Динамика этой системы описывается уравнением водного баланса озера, включающего морфометрические характеристики водоема и – для проточных озер – параметры зависимости стока из озера от уровня воды [Крицкий, Менкель, 1964; Музылев и др., 1982; Санин и др., 1991; Румянцев, Трапезников, 2008; Фролов и др., 2018].

Цель работы – прогноз нового равновесного уровня воды системы озер Айдаркуль–Тузкан с учетом новейших гидротехнических преобразований с применением метода Монте-Карло к системе разностных стохастических уравнений, образующих

динамико-стохастическую модель колебаний уровня воды. Оценка равновесного уровня воды и соответствующих доверительных интервалов для системы озер Айдаркуль–Тузкан выполнена с учетом строительства Верхне-Арнасайского водохранилища, аккумулирующего сток Сырдарьи, который не может быть пропущен через Шардаринский гидроузел. Расчет был выполнен для столетнего периода времени.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Характеристика объекта и района исследования.** Айдар-Арнасайская озерная система – крупнейшая водная система на территории Республики Узбекистан, образовавшаяся в среднем течении р. Сырдарьи южнее Шардаринского водохранилища (рис. 1). Ее появление связано с развитием орошаемого земледелия: с 1957 г. поступление коллекторно-дренажных вод (КДВ) по Центральному Голодностепскому каналу постепенно привело к формированию ирригационно-сбросовых озер на месте степных эфемерных, крупнейшим из которых было озеро Тузкан, входящее в настоящее время в данную озерную систему в виде восточной котловины. Во второй половине 1960-х гг. после завершения строительства Шардаринского водохранилища пробные сбросы из него и увеличение притока КДВ при освоении новых площадей привели к росту площади озерной системы. Кардинальная перестройка гидрографической сети с образованием озерной системы площадью около 2400 км<sup>2</sup> произошла в 1969 г. при сбросе более 21 км<sup>3</sup> из Шардаринского водохранилища. Так образовалось второе по размеру озеро в регионе после усыхающего Аральского моря. В дальнейшем уровень воды в озерной системе медленно понижался, а минерализация воды увеличивалась [Видинеева, 1974]. С начала 1990-х гг. изменение условий регулирования Токтогульского водохранилища (повышенный сток в зимние месяцы в среднем течении Сырдарьи) привело к необходимости возобновления сбросов воды из Шардаринского водохранилища. Причиной этого является недостаточная пропускная способность русла Сырдарьи в ее нижнем течении и гидроузла водохранилища, что обусловило очередную фазу подъема уровня в системе озер (рис. 2).

Для аккумуляции и дальнейшего использования пресной воды в 2005 г. Арнасайские озера были отделены плотиной от общей системы, а Центральный Голодностепский коллектор (ЦГК) продлен до котловины оз. Тузкан для предотвращения засоления созданного Верхне-Арнасайского водохранилища, питаемого сбросами пресной воды из Шардаринского водохранилища. В насто-

ящее время в оставшуюся систему озер Айдаркуль–Тузкан из Верхне-Арнасайского водохранилища вода сбрасывается нерегулярно – только при сбросах из Шардаринского водохранилища более 0,5 км<sup>3</sup> [Экспедиционное..., 2011]. Изменение водного баланса озерной системы привело к снижению уровня и увеличению минерализации воды, что вызывает опасения за ее экологическое благополучие. В настоящее время озерная система является рыбохозяйственным водоемом, а с 2008 г. входит в перечень международных охраняемых озер и ветландов. Неблагоприятные последствия усыхания Аральского моря актуализируют оценку дальнейшего развития озерной системы, которая стала природообразующей для прилегающих территорий. Как и любой антропо-

генно-созданный водный объект, озерная система требует поддержания ее состояния, удовлетворительного для хозяйственного использования, поэтому возможное прогрессирующее обмеление будет необходимо компенсировать, для чего требуется заблаговременно подготовить проекты соответствующих мероприятий. Расчеты водного и солевого баланса озерной системы, выполненные ранее, опубликованы в трудах [Видинеева, 1974] и [Горелкин, Никитин, 1976; Горелкин, 1985], однако гидротехнические преобразования новейшего времени, изменение положения устья ЦГК делают актуальной задачу новых расчетов и прогнозов уровня режима системы озер Айдаркуль–Тузкан из-за опасения, что данный водоем может повторить судьбу Арала.

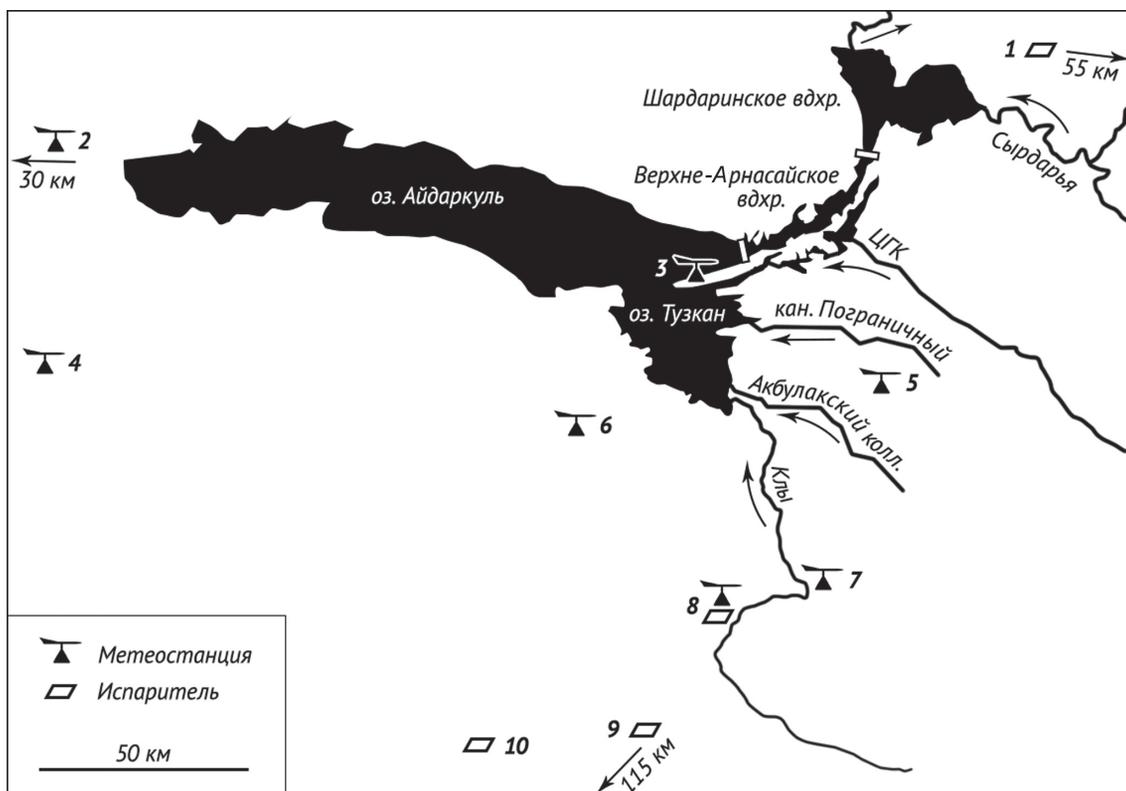


Рис. 1. Схема озерной системы Айдаркуль–Тузкан.

Пункты наблюдений: 1 – Туябугуз; 2 – Машикудук; 3 – Западный Арнасай; 4 – Нурата (Нурота); 5 – Дустлик; 6 – Янгикишлак; 7 – Джизак; 8 – Галляарал; 9 – Чимкурган; 10 – Дагбит. Стрелками показано направление и расстояние до метеостанций, находящихся за пределами участка на схеме

Fig. 1. Sheme of the Aidarkul–Tuzkan lake system.

Numbers indicate observation points: 1 – Tuyabuguz; 2 – Mashikuduk; 3 – West Arnasay; 4 – Nurata (Nurota); 5 – Dustlik; 6 – Yangikishlak; 7 – Jizzak; 8 – Gallyaaral; 9 – Chimkurgan; 10 – Dagbit. Arrows show direction and distance towards meteorological stations, situated out of the region on the scheme

Климат исследуемого района резко континентальный: зима холодная, малоснежная, лето сухое и жаркое. Количество осадков над котловиной озерной системы увеличивается с запада на восток: среднегодовой слой осадков на метеостанции Машикудук составляет 161,5 мм/год, на метеостанции

Джизак – 377 мм/год. Причем отмечается значительная изменчивость как внутригодового распределения осадков (максимум в марте–апреле), так и их годовой суммы. До начала освоения Голодной степи водой была заполнена только котловина озера Тузкан, которая принимала сток реки Клы, а дно

Айдаро-Арнасайского понижения занимали высохшие солончаки и шоры. В результате развития орошения, строительства сети дренажных каналов и увеличения притока КДВ сформировалась сложная система, стабильность которой зависит от поступления в нее воды через Верхне-Арнасайскую плотину и КДВ с орошаемых земель Голодной и Джизакских степей. Наиболее крупные коллекторы, по которым поступает слабоминерализованная вода (до 4000 мг/л) – ЦГК, Клы, Акбулак и Пограничный. В настоящее время их суммарный приток составляет около 2,3 км<sup>3</sup>.

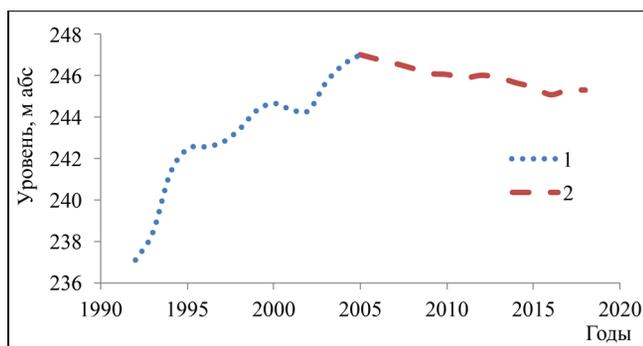


Рис. 2. Среднегодовые значения уровня воды в системе озер до и после ввода в эксплуатацию Верхне-Арнасайского водохранилища (2005 г.):

1 – уровень Айдар-Арнасайской системы озер; 2 – уровень системы озер Айдаркуль–Тузкан

Fig. 2. The average annual water level in the lake system before and after the construction of the Upper Arnasay Dam. Legend: 1 – level of the Aidar-Arnasay lake system; 2 – level of the Aidarkul–Tuzkan lake system

Атмосферные осадки, выпадающие на зеркало озера, согласно предшествующим исследованиям [Горелкин, 1985], составляли в среднем 8% от приходной части водного баланса, в отдельные годы их доля увеличивалась до 20%. Подземный приток по данным исследований Средазгипроводхлопка [Горелкин, Никитин, 1976] оценивался в 0,7% приходной части водного баланса. Основная составляющая расходной части водного баланса – это испарение. Подземный отток соответствует величине подземного притока, поэтому данную составляющую в расчетах водного баланса в настоящей работе решено было не учитывать. В первые годы после затопления в 1969 г. значительные объемы воды ушли на насыщение почв и пород, однако в настоящее время эта составляющая не актуальна.

Основные приходные компоненты водного баланса системы озер, как упоминалось выше, это осадки на зеркало водоема, приток КДВ и сбросы через плотину из Верхне-Арнасайского водохранилища. Последняя компонента присутствует не ежегодно из-за использования воды для орошения и

весьма изменчива: за 2007–2017 гг. сбросы изменялись от 28 до 1918 млн м<sup>3</sup>/год и имели место не ежегодно. Согласно перспективам развития орошения в данном районе сбросы через Верхне-Арнасайскую плотину могут прекратиться, поэтому прогнозные расчеты были произведены для наиболее неблагоприятных условий – при их отсутствии.

Для расчетов компонентов водного баланса и прогноза изменений уровня важно проанализировать имеющуюся в наличии гидрометеорологическую информацию. Известно, что над крупными водоемами количество осадков может уменьшаться из-за образования устойчивой стратификации, поэтому использование данных наземных метеостанций (тем более в районе с неоднородным рельефом) не всегда оправдано. В распоряжении авторов были ряды ежедневных сумм осадков по пяти метеостанциям: Галлярал (571 м абс), Джизак (345 м абс), Дустлик (272 м абс), Янгикишлак (514 м абс), Западный Арнасай (250 м абс) (см. рис. 1). Ряды имеют различную продолжительность, по первым четырем станциям наблюдения имеются с 1970–1975 гг. По последней метеостанции данные имелись в наличии с июня 2012 г. Несмотря на короткий ряд, данный пункт имеет чрезвычайно удачное расположение на глубоко вдающемся в водное пространство мысу (см. рис. 1), поэтому данные, полученные с него, представляются наиболее репрезентативными для условий над водоемом. При сравнении с результатами измерений осадков наземных метеостанций за период синхронных наблюдений выявлено, что на метеостанции Западный Арнасай их количество на 27–42% меньше, чем на наземных станциях, перечисленных выше. Для приведения ряда среднемесячных сумм осадков Западного Арнася к многолетнему периоду использована зависимость от количества осадков на метеостанции Янгикишлак:  $y = 0,69x + 7,70$ . Для рядов совместных наблюдений этих метеостанций коэффициент корреляции среднемесячных сумм осадков 0,93 значим при  $p = 0,05$ . Для остальных метеостанций коэффициент корреляции незначим. Для проверки восстановленного таким образом ряда были привлечены результаты, опубликованные в отчете экспедиции за 2000–2010 гг. [Экспедиционное..., 2011]. В нем использовалось среднее значение осадков на метеостанциях Машикудук, Нурота, Джизак, Дустлик и Янгикишлак. Первые две метеостанции отличаются меньшими суммами осадков из-за более континентального климата к западу от озерной системы. Коэффициент корреляции этих данных и восстановленного ряда по Западному Арнася составил 0,76, что значимо для  $p = 0,01$ . Также произведено сравнение среднемноголетнего значения восстановленного ряда для 1975–2019 гг. и среднегодового

значения осадков за 1965–1982 гг., определенного методом изогьет [Горелкин, 1985]. Значения составили 239 и 234 мм, что говорит о приемлемости используемой методики при отсутствии данных метеостанций Машикудук и Нурота.

Приток КДВ является в настоящее время первой по значимости компонентой приходной части водного баланса. Формирование стока коллекторов происходит за счет подземной и поверхностной составляющих. Увеличение расходов воды в период поливов составляет от двух раз для канала Пограничный до 4–5 раз для каналов Акбулак, Клы и ЦГК [Чембаров и др., 2016]. В работе использована информация о коллекторном стоке для замыкающих створов.

Расчет испарения для оценки его характерных значений за предшествующий период производился по формуле ГГИ, для оценки адекватности полученных результатов использованы данные наземных испарителей на станциях Галлярал (1976–2019), Дагбит (1986–2019), Тюябугуз (1965–2019) и Чимкурган (1969–2019). Расчет испарения для периода отсутствия данных метеостанции Западный Арнасай (до 2013 г.) выполнен по метеоданным, полученным комбинированным методом, поскольку рекомендованный в Указаниях по расчету испарения [Кузнецов и др., 1969] метод приведения данных наземных метеостанций к условиям над водной поверхностью при сравнении с данными метеостанции Западный Арнасай не дал удовлетворительных результатов. В качестве среднемесячной температуры воздуха над водоемом принята средняя темпера-

тура на станциях Джизак и Дуслик, поскольку эти значения практически совпадают с измеренными на Западном Арнасае ( $r=0,99$ ,  $n=91$ ). Скорость ветра принята по станции Янгикишлак ( $r=0,4$ ,  $n=91$ ), а влажность воздуха рассчитана исходя из среднего парциального давления водяного пара на станциях Галлярал, Янгикишлак, Джизак и Дуслик и температуры воды гидрологического поста Западный Арнасай с введением поправок, рекомендованных в Указаниях [Кузнецов и др., 1969]. За период метеорологических наблюдений на Западном Арнасае (2013–2019) расчетная величина слоя испарения по данным этой метеостанции составила в среднем 1098 мм, расчет по комбинированным данным – 1102 мм. По наблюдениям на испарителях на станциях Галлярал, Дагбит, Тюябугуз и Чимкурган испарение составило 1284, 1167, 993 и 1314 мм соответственно. Следовательно, расчетные методы хорошо воспроизводят величину потерь воды на испарение. Отличающееся значение на последней станции связано с ее большой удаленностью к югу от района исследований.

На основании полученных рядов осадков, притока и испарения рассчитаны значения годового водного баланса для 2007–2018 гг. для озерной системы Айдаркуль–Тузкан после отделения Верхне-Арнасайских озер плотиной (табл. 1). Зависимости площади и объема озерной системы от уровня воды (пост Западный Арнасай) получены по результатам обработки новейшей батиметрической съемки в 2019 г.

Таблица 1

**Годовые значения оставляющих водного баланса системы озер Айдаркуль–Тузкан за 2007–2017 гг.**

Годы	КДВ, км <sup>3</sup>	АО, км <sup>3</sup>	Е, км <sup>3</sup>	ВАВ, км <sup>3</sup>	$\Sigma_{\text{п}} - \Sigma_{\text{р}}$	$\Delta W$ , км <sup>3</sup>	N, км <sup>3</sup>	N, %
2007	2,18	0,85	3,51	0,392	-0,09	-0,52	0,43	12,2
2008	1,85	0,57	3,75	0,648	-0,67	-1,16	0,48	12,9
2009	2,53	0,91	3,43		0,00	-0,45	0,45	13,3
2010	2,82	0,60	3,74	0,554	0,24	0,09	0,15	3,7
2011	2,25	0,88	3,56		-0,43	-0,72	0,28	7,9
2012	2,39	0,60	3,04	1,316	1,27	0,60	0,67	15,6
2013	2,20	0,69	2,88		0,01	-0,63	0,64	22,0
2014	2,10	0,71	3,19		-0,38	-0,41	0,04	1,1
2015	2,18	0,76	3,48	0,028	-0,51	-1,31	0,80	23,1
2016	2,22	0,63	3,63		-0,78	-0,69	-0,09	-2,5
2017	2,58	0,74	4,03	1,918	1,21	1,27	-0,06	-1,1

*Примечание:* КДВ – приток коллекторно-дренажных вод; АО – атмосферные осадки; Е – испарение; ВАВ – переток из Верхне-Арнасайского водохранилища;  $\Delta W$  – изменение объема воды в системе;  $\Sigma_{\text{п}} - \Sigma_{\text{р}}$  – разность приходных и расходных компонентов баланса; N – невязка баланса.

За последнее десятилетие, несмотря на эпизодическое поступление воды из Верхне-Арнасайского водохранилища, уровень воды в системе озер снижался. В отдельные годы невязка водного баланса превышает 10%, но в среднем за период составляет 9,8%. Результирующая водного баланса  $\Sigma_{\text{п}} - \Sigma_{\text{р}}$  (разность сумм приходных и расходных компонентов) в ряде случаев меньше, чем изменение объема, определенное по уровню воды. Если бы это несоответствие было систематическим, можно было бы предположить, что это связано с завышением расчета количества осадков или занижением испарения. Но скорее причина в определении перетока воды через плотину и погрешностях учета КДВ.

Моделирование многолетних колебаний уровня оз. Айдаркуль–Тузкан на перспективу до 2120 г. Уравнение, описывающее колебание уровня  $h_t$  бессточного озера, имеет вид:

$$h_t = h_{t-1} + \frac{q_t}{F_t} + p_t - e_t, \quad (1)$$

где  $F_t$  – площадь акватории озера;  $q_t$  – объем притока в озеро;  $p_t$  и  $e_t$  – слои осадков и испарение по акватории;  $t$  – время.

Составляющие водного баланса озера, входящие в (1), обычно моделируются авторегрессионными (марковскими) процессами первого порядка (обозначаются AP(1)),

$$q_t = \rho_q q_{t-1} + w_t^{(q)}, \quad (2)$$

$$p_t = \rho_p p_{t-1} + w_t^{(p)}, \quad (3)$$

$$e_t = \rho_e e_{t-1} + w_t^{(e)}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – параметры авторегрессии;  $w_t$  – белые шумы. Предполагается, что процессы (2–4) взаимно коррелированы с коэффициентами корреляции  $r_{qp}$ ,  $r_{pe}$  и  $r_{qe}$ . Уравнения (2–4) обеспечивают совпадение основных статистических характеристик – средних, дисперсий, коэффициентов авто- и взаимной корреляции моделируемых рядов с соответствующими параметрами, составляющих водного баланса озера, полученными по натурным рядам. Применительно к моделированию многолетних колебаний уровня озер Айдаркуль–Тузкан, в силу нормализации колебаний уровня бессточного водоема с малым параметром инерционности [Музылев и др., 1982], процессы (2–4) принимаются гауссовыми. Зависимость площади озера от уровня (рис. 3) в общем случае нелинейная, однако допускает удовлетворительную линейную аппроксимацию.

Данные по морфометрии и статистическим характеристикам компонент водного баланса озера Айдаркуль–Тузкан были использованы для имитационного моделирования ансамбля реализаций колебаний уровня динамико-стохастической систе-

мой (1–4). В результате усреднения по ансамблю из 2000 100-летних реализаций уровня были получены оценки равновесных отметок уровня («уровней тяготения» [Крицкий, Менкель, 1964; Музыкаев и др., 1982; Румянцев, Трапезников, 2008]) и доверительные интервалы этих оценок применительно к вариантам притока в озеро. Основные положения использованного метода моделирования марковских последовательностей с заданными статистическими характеристиками (средними, дисперсиями, коэффициентами авто- и взаимной корреляции) можно найти в работах [Фролов и др., 2014; Фролов и др., 2018].

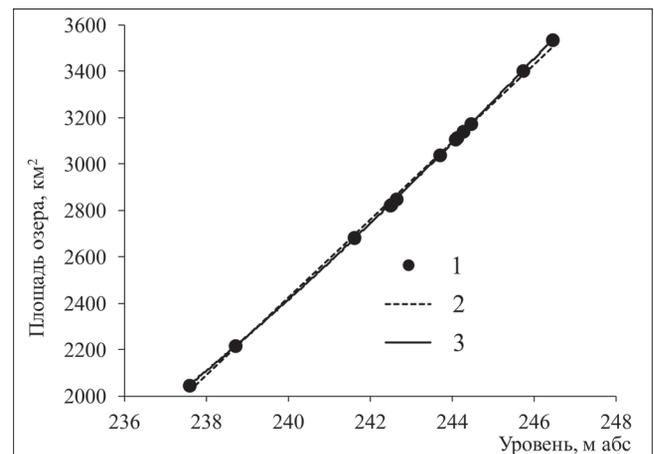


Рис. 3. Площадь акватории озер Айдаркуль–Тузкан как функция уровня воды в озере:

1 – натурные данные; 2 – линейное приближение; 3 – параболы и кубические приближения (слившиеся кривые) соответственно

Fig. 3. Surface area of the Aidarkul–Tuzkan lake system as a function of level.

Legend: 1 – black circles – measured data; 2 – linear approximation; 3 – merged parabolic and cubic approximations, respectively

Применение этого метода к моделированию составляющих водного баланса озер Айдаркуль–Тузкан дает последовательности годовых величин притока КДВ, осадков и испарения по акватории озера в виде множества реализаций на заданный период прогноза. Эти смоделированные последовательности имеют статистические характеристики составляющих водного баланса озера, совпадающие с величинами, полученными по натурным данным (табл. 2). Анализ данных об испарении по данным испарителей показал, что на всех пунктах наблюдений отсутствует статистически значимый тренд величины слоя испарения. Для метеостанций Дуслик, Джизак, Гялляарал и Янгикишлак для 1975–2019 гг. статистически значимый тренд в колебаниях годовых сумм осадков также отсутствует. По этим причинам в прогноз не включали сценарии клима-

тических изменений этих составляющих водного баланса, ограничившись расчетом их реализаций как стационарных авторегрессионных процессов [Фролов и др., 2014]. Приток воды из Верхне-Арнасайского водохранилища на перспективу принят равным 0, с тем чтобы получить прогноз при наиболее неблагоприятной ситуации. Таким образом, сценарии отличались значениями притока КДВ: в первом случае его среднее значение совпадает с фак-

тическим за 1995–2017 гг., во втором случае предполагаем, что приток КДВ возрастет на 0,5 км<sup>3</sup>/год (например, за счет увеличения орошаемых площадей), в третьем – сократится на 0,5 км<sup>3</sup>/год (внедрение водосберегающих технологий и изменение видового состава возделываемых культур). Начальное положение уровня принято равным среднегодовому на 2019 г. На рисунке 4 приведены результаты расчетов уровня воды системы озер Айдаркуль–Тузкан.

Таблица 2

**Выборочные оценки статистических характеристик составляющих водного баланса озер Айдаркуль–Тузкан за 1995–2017 гг.**

Составляющие водного баланса	Характеристики составляющих водного баланса					
	Среднее	Дисперсия	Коэффициент автокорреляции	Матрица коэффициентов взаимной корреляции		
				Приток КДВ	Осадки	Испарение
Приток КДВ, км <sup>3</sup> /год	2,2	0,2	0,5	1,0	0,2	0
Осадки, м/год	0,2	0	0,1	0,2	1,0	0
Испарение, м/год	1,3	0	0,3	0	0	1,0

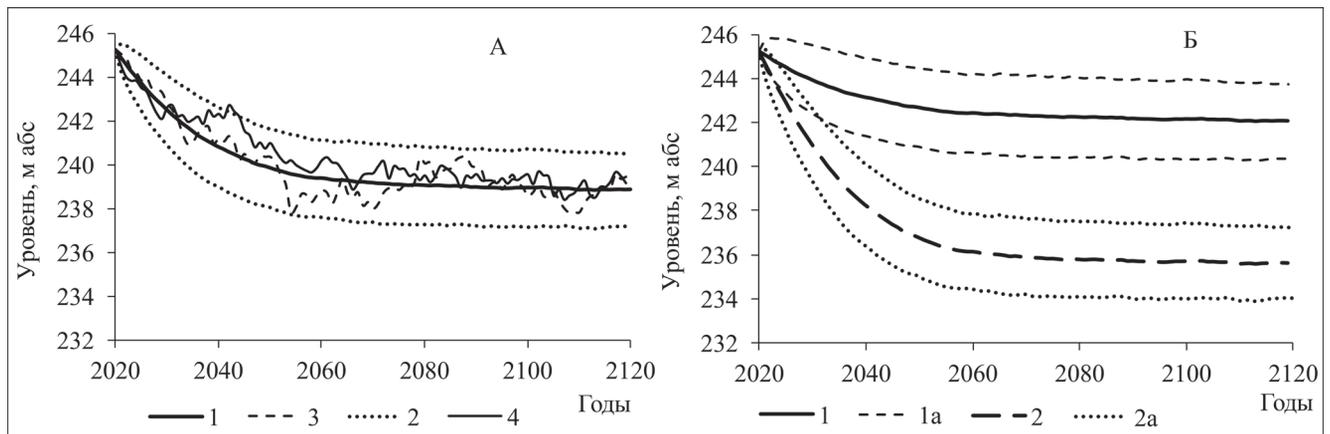


Рис. 4. Проекция изменения уровня озер Айдаркуль–Тузкан:

А – при среднем современном притоке КДВ 2,23 км<sup>3</sup>/год (1 – математическое ожидание уровня; 2 – границы 90%-го доверительного интервала; 3, 4 – примеры возможного хода уровня); Б: 1 и 2 – условные математические ожидания уровня при среднем притоке 1,73 км<sup>3</sup>/год и 2,73 км<sup>3</sup>/год соответственно; 1а, 2а – границы 95%-х доверительных интервалов. Статистические характеристики осадков и испарения по акватории озера приняты одинаковыми для всех вариантов расчетов (см. табл. 2)

Fig. 4. The Aidarkul–Tuzkan lake level change projections:

A: under modern average drainage water inflow of 2,23 km<sup>3</sup>/year; 1 – mathematical expectation of level; 2 – 90% confidence interval boundaries; 3 and 4 – examples of possible level changes; Б: 1 and 2 – conditional mathematical level expectation under average inflows of 1,73 km<sup>3</sup>/year and 2,73 km<sup>3</sup>/year respectively; 1a and 2a – the boundaries of 95% confidence intervals. The statistical characteristics of precipitation and evaporation are the same for all calculations (see Table 2)

Сравнение графиков условных (т. е. зависящих от начальных условий – уровня и составляющих водного баланса) математических ожиданий уровня на рисунке 4 (А и Б) свидетельствует о значительном влиянии изменений средней величины притока в озеро на его уровень. Разница в среднем притоке на ±0,5 км<sup>3</sup>/год по отношению к среднему современному притоку 2,23 км<sup>3</sup>/год приводит к разнице

в уровнях на 2120 г. на 6,4 м (см. рис. 4Б). Причем положение уровня, как показано примерами некоторых реализаций, может существенно отличаться от его математического ожидания (до 2 м при 90%-м доверительном интервале; см. рис. 4А). Для сохранения водной экосистемы в современном состоянии крайне важно не сокращать поступление КДВ, либо компенсировать приток иной подпиткой.

Введение водосберегающих технологий и прогрессивной техники полива в сельском хозяйстве (ст. 50 Закона Узбекистана «О воде и водопользовании»), поощряемые налоговыми и кредитными льготами, замена производимых культур при неизменных орошаемых площадях могут привести к сокращению притока КДВ и обмелению озера. Последствием обмеления может стать выдувание солей с обсохшей территории, засоление почв выпадающими аэрозолями, увеличение солености озера из-за испарительного концентрирования. В настоящей статье не рассматривается прогноз изменения солености воды, однако совершенно очевидно, что периодическая подпитка озерной системы пресной водой из Шардаринского водохранилища оказывала бы благотворное влияние на стабилизацию уровня озера Айдаркуль–Тузкан и препятствовала бы засолению. В настоящее время эта пресная вода аккумулируется в Верхне-Арнасайском водохранилище и используется для орошения и обводнения пастбищ. Для восполнения среднегодовой разницы между приходными и расходными составляющими водного баланса необходима ежегодная подпитка системы озера Айдаркуль–Тузкан объемом воды не менее  $0,5 \text{ км}^3/\text{год}$  (см. табл. 1), с тем чтобы уровень воды остался вблизи современной отметки.

**Благодарности.** Часть работы, связанная со стохастическим моделированием, выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0001 «Исследования процессов гидрологического цикла суши и формирования водных ресурсов, геофизических процессов в водных объектах и их бассейнах, формирования экстремальных гидрологических явлений и динамики гидрологических систем с учетом изменяющихся климатических условий и антропогенных факторов» Государственного задания ИВП РАН. Часть работы, связанная с водно-балансовыми расчетами, выполнена в рамках темы «Анализ, моделирование и прогнозирование изменений гидрологических систем, водных ресурсов и качества вод суши» (121051400038-1) государственного задания кафедр гидрологии суши МГУ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов, прогноз и управление. М.: Мир, 1974. Вып. 1. 406 с.
- Видинеева Е.М. Гидрохимический режим и солевой баланс некоторых водохранилищ Средней Азии: дис. ... канд. геогр. наук. Ташкент: ТашГУ, 1974. 188 с.
- Горелкин Н.Е. Гидрометеорологический, гидрохимический режим и прогноз водно-солевого баланса Арнасайской озерной системы: дис. ... канд. геогр. наук. Ташкент: ТашГУ, 1985. 164 с.
- Горелкин Н.Е., Никитин А.М. Водный баланс Арнасайской озерной системы // Труды САНИГМИ. 1976. Вып. 39(120). С. 76–93.
- Гречушников М.Г. Результаты численного моделирования изменения режима Можайского и Истринского водохранилищ при реализации сценария А2 глобального потепления // Метеорология и гидрология. 2014. № 3. С. 86–96.
- Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Колебания уровня замкнутых водоемов // Труды Гидропроекта. Энергия. 1964. Сб. 12. С. 29–61.
- Кузнецов В.И., Голубев В.С., Федорова Т.Г. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 85 с.
- Музылев С.В., Привальский В.Е., Раткович Д.Я. Стохастические модели в инженерной гидрологии. М.: Наука, 1982. 283 с.
- Озеро Сарыкамыш – водоем-накопитель коллекторно-дренажных вод. АН СССР, ИВП РАН. М.: Наука, 1991. 148 с.
- Привальский В.Е., Панченко В.А., Асарина Е.А. Модели временных рядов. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 226 с.
- Румянцев В.А., Трапезников Ю.А. Стохастические модели гидрологических процессов. М.: Наука, 2008. 152 с.
- Санин М.В., Алишеров Н.Б., Фролов А.В. Динамико-стохастическое моделирование процессов заполнения бессточных водоемов // ДАН СССР. 1991. Т. 316. № 6. С. 1472–1475.
- Фролов А.В., Выручалкина Т.Ю., Саркисян С.Г. Моделирование водно-солевого баланса Большого Яшалтинского озера // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 3. С. 1–9.

## ВЫВОДЫ

1. Уровень воды искусственно созданной системы озера Айдаркуль–Тузкан с 2006 г. находится в регрессивной фазе из-за прекращения регулярных сбросов воды из Шардаринского водохранилища.

2. При сохранении современного объема притока КДВ при отсутствии значительных изменений климата территории, следствием которых могут быть изменения годовых сумм осадков и испарения, за 100-летний период потенциально можно ожидать снижение равновесного уровня до отметки около 239 м абс, что почти на 6 м ниже современного.

3. Сценарные расчеты показали, что при увеличении притока КДВ на  $0,5 \text{ км}^3/\text{год}$  равновесный уровень опустится всего на 2 м, а при сокращении притока КДВ на  $0,5 \text{ км}^3/\text{год}$  (что весьма вероятно при внедрении водосберегающих технологий в сельском хозяйстве) равновесный уровень опустится на 9 м.

4. Для решения проблемы обсыхания, золотого выноса солей и стабилизации уровня озера необходимо продолжать регулярную подпитку системы озера водой из Шардаринского водохранилища через Верхне-Арнасайское водохранилище.

- Фролов А.В., Выручалкина Т.Ю., Соломонова И.В. Моделирование негауссова случайного процесса в приложении к гидрологии // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 6. С. 1–6.
- Чембарисов Э.И., Махмудов И.Э., Лесник Т.Ю., Беликов И.В., Вахидов Ю.С. Гидрологический и гидрохимический режимы коллекторно-дренажных вод, впадающих в Айдаро-Арнасайскую озерную систему // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2016. № 1(61). С. 191–196.
- Экспедиционное обследование Айдаро-Арнасайской системы озер в период с 21 сентября по 5 октября 2011 года. Отчет. НИЦ МКВК, Госкомприроды, Институт зоологии АН РУз. Ташкент, 2011. 77 с.
- Angel J.R., Kunkel K.E. The response of Great Lakes water levels to future climate scenarios with an emphasis on Lake Michigan-Huron, *Journal of Great Lakes Research*, Supplement 2, 2009, vol. 36, p. 51–58.
- Privalsky V. Time Series Analysis in Climatology and Related Sciences (Progress in Geophysics), 2020, Springer, Berlin, 372 p.
- Rukhovets L.A., Filatov N.N. Ladoga and Onega – Great European Lakes: Observation and Modeling, Springer-Praxis Publishing, 2010, 320 p.

Поступила в редакцию 10.08.2020

После доработки 15.09.2021

Принята к публикации 22.11.2021

## WATER LEVEL REGIME IN THE AIDARKUL–TUZKAN LAKE SYSTEM (EASTERN ARAL SEA REGION) IN THE 21<sup>ST</sup> CENTURY

M.G. Grechushnikova<sup>1</sup>, A.V. Frolov<sup>2</sup>, D.N. Aybulatov<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology

<sup>1,2</sup> Institute of Water Problems, RAS, Laboratory of Global Hydrology

<sup>1</sup> Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; Senior Scientific Researcher (IWP RAS); e-mail: allavis@mail.ru

<sup>2</sup> Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Technics; e-mail: anatolyfrolov@yandex.ru

<sup>3</sup> Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: gidroden@mail.ru

The work deals with the assessment of possible changes in the level regime of a largest water body in Central Asia. The anthropogenic Aidar-Arnasay lake system is formed by the inflow of drainage waters from the eastward-situated irrigated lands. In the past periodic discharges of fresh water from the Shardara reservoir led to water level transgression in the lake system. The damming of the Arnasai lakes and the projected absence of fresh water inflow put a task of assessing water level change in the remaining Aidarkul–Tuzkan system, taking into account various options for the volume of drainage water inflow. The problem was solved on the basis of simulation modeling of the water balance stochastic equation for the lake system. If the current volume of the annual inflow is maintained, the future equilibrium water level will drop from the current level of 245 m abs to about 239 m abs. Under the increase of average inflow by 0.5 km<sup>3</sup>/year the level will fluctuate near the equilibrium level of 243 m abs. Under the same decrease in the average inflow the equilibrium level will drop to 236 m abs.

**Keywords:** water balance, precipitation, evaporation, drainage water, modeling

**Acknowledgements.** Part of the work related to stochastic modeling was carried out within the theme No. FMWZ-2022-0001 “Studies of the processes of the land hydrological cycle and the formation of water resources, geophysical processes in water bodies and their basins, the formation of extreme hydrological phenomena and the dynamics of hydrological systems, under changing climatic conditions and anthropogenic factors” of the State Task of the IWP RAS. Part of the work related to water balance calculations was carried out under the theme “Analysis, modeling and forecasting of changes in hydrological systems, water resources and land water quality” (121051400038-1) of the state task of the MSU Department of Land Hydrology.

### REFERENCES

- Angel J.R., Kunkel K.E. The response of Great Lakes water levels to future climate scenarios with an emphasis on Lake Michigan-Huron, *Journal of Great Lakes Research*, Supplement 2, 2009, vol. 36, p. 51–58.
- Box G.E.P., Jenkins G.M. Time series analysis: forecasting, and control, Holden-Day, 1970, 553 p.
- Chembarisov E.I., Mahmudov I.E., Lesnik T.Yu., Belikov I.V., Vahidov Yu.S. [Hydrological and hydrochemical regime of drainage inflow to the Aidar-Arnasay Lake System], *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeniya* [Ways to improve the efficiency of irrigated agriculture], 2016, vol. 1(61), p. 191–196. (In Russian)
- Ekspeditsionnoe obsledovanie Aidaro-Arnasayskoi sistemy ozer v period s 21 sentyabrya po 5 oktyabrya 2011 goda [Aidar-Arnasay Lake System Expeditionary Survey from 21 September to 5 October 2011], Otchet, NITs

- MKVK, Goskomprirody, Institut zoologii AN RUz, Tashkent, 2011, 77 p. (In Russian)
- Frolov A.V., Vyruchalkina T.Yu., Solomonova I.V. Simulating a non-Gaussian vector process with application in hydrology, *Water Resources*, 2014, vol. 41, no. 6, p. 621–626.
- Frolov A.V., Vyruchalkina T.Yu., Sarkisyan S.G. Modeling water and salt balance of Bolshoe Yashaltinskoe Lake], *Water Resources*, 2018, vol. 45, no. 3, p. 318–325.
- Gorelkin N.E. *Gidrometeorologicheskii, gidrokhimicheskii rezhim i prognoz vodno-solevogo balansa Arnasaiskoi ozernoi sistemy* [Hydrometeorological, hydrochemical regime and forecast of water and salt balance of the Arnasai lake system], Ph.D. Thesis in Geography, Tashkent, Tashkent State University, 1985, 164 p. (In Russian)
- Gorelkin N.E., Nikitin A.M. [Water balance of the Arnasai lake system], *Trudy SARNIGMI* [Proceedings SARNIGMI], 1976, part 39(120), p. 76–93. (In Russian)
- Grechushnikova M.G. Rezul'taty chislennogo modelirovaniya izmeneniya rezhima Mozhayskogo i Istrinskogo vodohranilishch pri realizacii scenariya A2 global'nogo potepeniya [The results of numerical simulation of regime variations in the Mozhaisk and Istra reservoirs under the A2 scenario of global warming], *Meteorologiya i gidrologiya*, 2014, no. 3, p. 86–96. (In Russian)
- Kritskii S.N., Menkel' M.F. [Level oscillations of drainless water bodies], *Trudy Gidroproekta* [Gidropriekt proceedings], Energiya Publ., 1964, vol. 12, p. 29–61. (In Russian)
- Kuznetsov V.I., Golubev V.S., Fedorova T.G. *Ukazaniya po raschetu ispareniya s poverkhnosti vodoemov* [Guidance for calculation of evaporation from water surface], Lenin-grad, Gidrometeoizdat Publ., 1969, 85 p. (In Russian)
- Muzylev S.V., Prival'skii V.E., Ratkovich D.Ya. *Stokhasticheskie modeli v inzhenernoi gidrologii* [Stochastic models in engineering hydrology], Moscow, Nauka Publ., 1982, 283 p. (In Russian)
- Ozero Sarykamysch – vodoem-nakopitel' kollektorno-drenaznykh vod* [Lake Sarykamysch – a reservoir for collecting of drainage water], AN SSSR, Water Problem Institute, Moscow, Nauka Publ., 1991, 148 p. (In Russian)
- Prival'skiy V.E., Panchenko V.A., Asarina E.A. *Modeli vremennykh ryadov* [Time series models], St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1992, 226 p. (In Russian)
- Privalsky V. *Time Series Analysis in Climatology and Related Sciences* (Progress in Geophysics), 2020, Springer, Berlin, 372 p.
- Rukhovets L.A., Filatov N.N. *Ladoga and Onego – Great European Lakes: Observation and Modeling*, Springer-Praxis Publishing, 2010, 320 p.
- Rumyantsev V.A., Trapeznikov Yu.A. *Stokhasticheskie modeli gidrologicheskikh protsessov* [Stochastic models of hydrologic processes], Moscow, Nauka Publ., 2008, 152 p. (In Russian)
- Sanin M.V., Alisherov N.B., Frolov A.V. *Dinamiko-stokhasticheskoe modelirovanie protsessov zapolneniya besstochnykh vodoemov* [Dynamic and stochastic modeling of filling processes of drainless water bodies], *DAN SSSR*, 1991, vol. 316, no. 6, p. 1472–1475. (In Russian)
- Vidineeva E.M. *Gidrokhimicheskii rezhim i solevoi balans nekotorykh vodokhranilishch Srednei Azii* [Hydrological regime and salt balance of some water reservoirs in Middle Asia], Ph.D. Thesis in Geography, Tashkent, Tashkent State University, 1974, 188 p. (In Russian)

Received 10.08.2020

Revised 15.09.2021

Accepted 22.11.2021