

## Сценарные характеристики уровенно-минерализационного режима системы озер Айдар-Тузкан

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

 allavis@mail.ru

<sup>1</sup> ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук»,  
Москва, Россия

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Московский государственный университет  
имени М.В.Ломоносова», Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Работа посвящена прогнозу уровня режима искусственно созданной системы озер Айдаркуль-Тузкан. Водный баланс этих озер отражает изменения режима притока коллекторно-дренажных вод и сбросов воды из Чардарьинского водохранилища. Актуальность темы обусловлена необходимостью оценки перспективного изменения уровня режима озер Айдаркуль-Тузкан в связи с постройкой плотины, ограничившей приток воды из Арнасайских озер и последовавшей с 2006 г. устойчивой регрессией уровня воды в озерах. Выполненные ранее прогнозы уровня режима системы озер в сложившихся условиях требуют коррекции, учитывая большую практическую значимость водного объекта для региона. **Методы.** Задача решалась на основе динамико-стохастической модели многолетних колебаний уровня бессточного водоема с учетом зависимости испарения с акватории от солености озерной воды. **Результаты.** При сохранении современного среднего притока коллекторно-дренажных вод 2,2 км<sup>3</sup>/год, уровень воды в озере в перспективе будет иметь равновесную отметку 241,9 м абс и соленость воды 61 ‰. При уменьшении среднего притока до 1,7 км<sup>3</sup>/год – равновесный уровень снизится до отметки 239 м абс, соленость озерных вод увеличится до 92 ‰. При увеличении притока до 2,7 км<sup>3</sup>/год изменение уровня и солености по отношению к современным величинам будут минимальными: равновесная отметка уровня – 245,1 м абс, соленость – 46 ‰.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** коллекторно-дренажные воды, водный баланс, динамико-стохастическая модель, уровень режим озера, система озер Айдар-Тузкан.

**Финансирование:** стохастическое моделирование выполнено 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; водно-балансовые расчеты и анализ данных метеостанций проведены в рамках темы «Анализ, моделирование и прогнозирование изменений гидрологических систем, водных ресурсов и качества вод суши» (121051400038-1) государственного задания кафедры гидрологии суши МГУ.

**Для цитирования:** Гречушникова М.Г., Фролов А.В., Айбулатов Д.Н. Сценарные характеристики уровня-минерализационного режима системы озер Айдар-Тузкан // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 5. С. 5-20. DOI: 10.35567/19994508\_2023\_5\_1.

Дата поступления 16.10.2022.

© Гречушникова М.Г., Фролов А.В., Айбулатов Д.Н., 2023

## SCENARIO CHARACTERISTICS OF THE AIDAR-TUZKAN LAKE SYSTEM LEVEL/MINERALIZATION REGIME

Maria G. Grechushnikova<sup>1,2</sup> , Anatoliy V. Frolov<sup>1</sup> , Denis N. Aybulatov<sup>2</sup> 

 allavis@mail.ru

<sup>1</sup> Russian Academy of Sciences Institute of Water Problems, Moscow, Russia

<sup>2</sup> M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

### ABSTRACT

**Relevance.** This work is devoted to forecasting the level regime of the artificially created Aidarkul-Tuzkan lake system. Water balance of these lakes reflects changes in collector-drainage water inflow regime and water releases from the Chardara reservoir. The relevance of the topic is conditioned by the necessity of assessing prospective changes in the level regime of the Aidarkul-Tuzkan lakes due to construction of the dam that limited water inflow from the Arnasay lakes and the steady regression of water level in the lakes that followed since 2006. Previously made forecasts of the lake system level regime in the existing conditions need to be corrected taking into account a great practical importance of the water body for the region. **Methods.** The problem was solved based on the dynamic-stochastic model of multiyear fluctuations of the level of the drainless water body considering dependence of evaporation from the water area on lake water salinity. **Results.** Under preservation of current average inflow of 2.2 km<sup>3</sup>/year CDW, the water level in the lake will have equilibrium mark 241.9 m abs and lake water salinity 61‰. When the average inflow decreases to 1.7 km<sup>3</sup>/year the equilibrium level will decrease to 239 m abs, the salinity of lake water will increase to 92 ‰. At increase of inflow up to 2.7 km<sup>3</sup>/year level change and salinity in relation to modern values will be minimal: equilibrium level mark will be 245,1 m abs, salinity will be 46 ‰.

**Keywords:** collector-drainage water, water balance, dynamic-stochastic model, lake level regime, climate, Aidar-Tuzkan lake system.

**Financing:** stochastic modeling was performed within the framework of the topic no. FMWZ-2022-0001 “Studies of the land hydrological cycle processes and the formation of water resources, geophysical processes in water bodies and their basins, the formation of extreme hydrological phenomena and dynamics of hydrological systems taking into account changing climatic conditions and anthropogenic factors” of the State task of the IWP RAS; water balance calculations and analysis of weather stations data were carried out within the framework of the topic “Analysis, modeling and forecasting of changes in hydrological systems, water resources and land water quality” (121051400038-1) of the state assignment of the Department of Hydrology of Moscow State University.

**For citation:** Grechushnikova M.G., Frolov A.V., Aybulatov D.N. Scenario characteristics of the Aidar-Tuzkan lake system level/mineralization regime. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 5. P. 5-20. DOI: 10.35567/19994508\_2023\_5\_1.

Received 16.10.2022.

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие орошения и освоение земель на аридных территориях в бассейне Аральского моря привело к формированию водоемов-накопителей дренажного стока. На фоне деградации Аральского моря возникли новые водоемы из-за глобального перераспределения водных ресурсов рек. Большое практическое значение имеют задачи прогноза уровня и солевого режима подобных водоемов, поскольку они стали неотъемлемой частью ландшафта, новыми источниками рыбных запасов [1–3]. В данной статье рассмотрены этапы

и методы сценарной оценки уровня режима системы озер-накопителей Айдар-Тузкан в бассейне р. Сырдарьи. Водоем включен в список Рамсарской конвенции водно-болотных угодий.

Айдаро-Арнасайская озерная система – крупнейший водоем на территории Республики Узбекистан. Система озер образовалась в бассейне среднего течения р. Сырдарьи, южнее Шардаринского водохранилища (рис. 1). До активного развития орошаемого земледелия на этом пространстве встречались степные эфемерные озера. Крупнейшим водным объектом было оз. Тузкан, питавшееся стоком р. Клы и входящее в настоящее время в озерную систему в виде восточной котловины. Дно Айдаро-Арнасайского понижения занимали высохшие солончаки и шоры.



Рис. 1. Схема района исследований.  
Fig.1. The scheme of the research area.

С 1957 г. поступление коллекторно-дренажных вод по Центральному Голодностепскому каналу постепенно привело к формированию ирригационно-сбросовых озер. Первый этап активного роста площади озерной системы отмечается во второй половине 1960-х годов после завершения строительства Шардаринского водохранилища, пробных сбросах из него и увеличения коллекторно-дренажного притока при освоении новых площадей. В 1969 г. при срезке пика половодья из Шардаринского водохранилища в котловину оз. Айдар было сброшено более  $21 \text{ км}^3$  воды из-за ограниченной пропускной способности гидроузла и опасности подтопления ниже по течению освоенных территорий. Озеро Айдар после прорыва перемычки соединилось с оз. Тузкан, образовав единую озерную систему площадью около  $2400 \text{ км}^2$  – вторую по размеру в регионе после усыхающего Аральского моря [2]. В дальнейшем до 1993 г. при отсутствии значительных сбросов уровень воды в озерной си-

стеме медленно понижался, а соленость увеличивалась. Стабилизация озерной системы наблюдалась в 1977–1982 гг., когда уровень воды находился на равновесных отметках около 235 м абс. К началу 1990-х годов с увеличением дренажного притока уровень воды повысился примерно на 2,5 м. Очередная фаза подъема уровня в системе озер отмечается с начала 1990-х годов при изменении условий регулирования Токтогульского водохранилища.

Повышение стока в зимние месяцы вызвало необходимость возобновить сбросы воды из Шардаринского водохранилища из-за недостаточной пропускной способности русла Сырдарьи в ее нижнем течении и гидроузла водохранилища. За период 1993–2005 гг. в Арнасайскую систему озер было переброшено 38,34 км<sup>3</sup> пресной воды из Сырдыры, т. е. Аральское море недополучило из-за данной переброски около 60 км<sup>3</sup> воды, что стало весомым фактором его деградации.

Для аккумуляции и дальнейшего использования пресной воды с целью повышения водообеспеченности орошаемых массивов Голодной степи Арнасайские озера были отделены плотиной от общей системы. Новое водохранилище выведено на нормальный эксплуатационный режим в 2005 г. Центральный Голодностепский коллектор (ЦГК) был продлен до котловины оз. Тузкан для предотвращения притока солоноватых дренажных вод в созданное Верхне-Арнасайское водохранилище, которое пополнялось сбросами пресной воды из Шардаринского водохранилища. Саморегулирующийся водослив из водохранилища имеет отметку 249,0 м абс. В настоящее время в оставшуюся систему озер Айдар-Тузкан из Верхне-Арнасайского водохранилища вода сбрасывается нерегулярно – только при сбросах из Шардаринского водохранилища объемом более 0,5 км<sup>3</sup> [3].

Трансформация водного баланса озерной системы привела к смене трансгрессивной фазы изменения уровня воды на регрессивную. Наибольшую площадь (3478 км<sup>2</sup>) водоем имел в 2006 г., после чего началось ее сокращение. При снижении уровня воды из-за потерь на испарение увеличивается ее соленость, что вызывает беспокойство за экологическое благополучие как водоема, так и прилегающих территорий. Озерная система является рыбохозяйственным водоемом, с 2008 г. входит в перечень международных охраняемых озер и wetlands. Несомненно, водоем придет к новому равновесному уровню в соответствии с гидрологическими условиями.

Опубликованные ранее расчеты и прогнозы водного и солевого баланса озерной системы [1–3], к сожалению, более не актуальны из-за произошедших гидротехнических преобразований. Поэтому проведение новых расчетов и прогнозов уровня режима системы озер Айдар-Тузкан на основе актуализированных современных данных является весьма важной задачей. Многочисленные неблагоприятные последствия усыхания Аральского моря делают оценку дальнейшего развития озерной системы особенно актуальной, поскольку крупный водоем стал природообразующим компонентом ландшафта и экономики региона.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Климат исследуемого района – резко континентальный с холодной, мало-снежной зимой и сухим, жарким летом. Среднегодовой слой осадков над котловиной озерной системы увеличивается с запада на восток от 161,5 мм/год на метеостанции Машикудук до 377 мм/год на метеостанции Джизак (рис. 1). Внутригодовое распределение осадков (максимум в марте-апреле) и их годовая сумма отличаются большой изменчивостью. Наиболее крупные коллекторы, по которым в настоящее время поступает около 2,3 км<sup>3</sup> слабосоленой воды (до 4000 мг/л) – ЦГК, Кылы, Акбулак и Пограничный.

Модели оценки многолетних колебаний уровней водоемов на перспективу могут быть статистическими, основанными только на статистических свойствах рядов уровней без учета физического механизма моделируемого процесса в явном виде. Для построения таких моделей используются методы, изложенные, например, в монографиях [4, 5]. Применяются также методы, основанные на коррелятивной связи между колебаниями уровней водоемов и некоторыми геофизическими, метеорологическими и геофизическими процессами, и методы, использующие так называемую «скрытую периодичность» процессов.

Для решения поставленной задачи применен динамико-стохастический подход. Многолетние колебания уровня водоема рассматриваются как результирующий процесс динамической системы, на вход которой поступают стохастические процессы, а именно – основные составляющие водного баланса водоема – приток, осадки и испарение. Динамика этой системы описывается уравнением водного баланса озера, которое включает морфометрические характеристики [6–9]. Для проточных озер необходимо задавать параметры зависимости стока из озера от уровня воды<sup>1</sup>.

Зависимость площади озера от уровня (рис. 2) в общем случае нелинейная, однако для оз. Айдар-Тузкан допускает удовлетворительную линейную аппроксимацию,

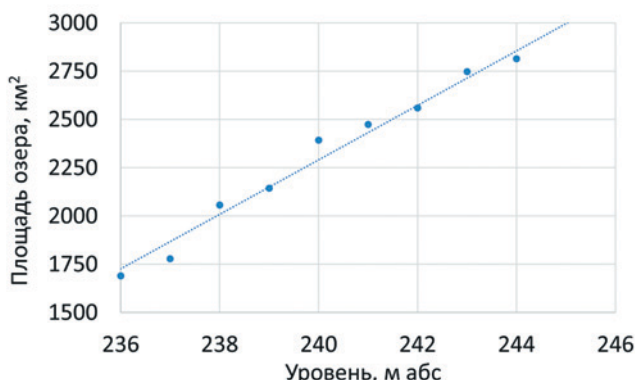
$$F_t = a + bh_t, \quad (1)$$

где площадь  $F_t$  измеряется в кв. км:  $a = 2280$  кв. км,  $b = 147,1$  кв. км/м;  $h_t$  измеряется в метрах от отметки 240 м в Балтийской системе отсчета.

Динамико-стохастическое моделирование уровня озера позволяет получить оценку реакции уровня водоема на изменение количественных характеристик составляющих водного баланса, включая и прогнозные оценки климатического или техногенного влияния.

В условиях бессточности озера поступление слабосоленых коллекторно-дренажных вод приводит к увеличению минерализации озерной воды. Поэтому формирование уровня озера имеет особенность, обусловленную зависимостью испарения от солености озерной воды. В этом случае для моделирования колебаний уровня воды в озере необходимо использовать два балансовых уравнения: уравнение, описывающее колебание уровня  $h_t$ ,

<sup>1</sup> Озеро Сарыкамыш – водоем-накопитель коллекторно-дренажных вод. АН СССР, ИВП РАН. М.: Наука, 1991. 148 с.



**Рис. 2.** Площадь акватории оз. Айдар-Тузкан как функция уровня воды в озере: черные кружки – натурные данные, прямая линия – линейное приближение.

Fig. 2. The Aydar-Tuzkan lake water area as a function of water level in the lake: black circles is field data, straight line is linear approximation.

$$h_t = h_{t-1} + \frac{q_t}{F_t} + p_t - e_t(s_t), \quad (2)$$

и уравнение баланса солей, поступающих в озеро с коллекторно-дренажными водами,

$$M_t = M_{t-1} + q_t s, \quad (3)$$

где  $F_t$  – площадь акватории озера;

$q_t$  – объем притока в озеро;

$p_t$  и  $e_t$  – слои осадков и испарение по акватории за единицу времени  $t$ ;

$M_t$  – масса солей в озере в  $t$ -й год;

$s$  – соленость коллекторно-дренажных вод (КДВ).

Соленость в  $t$ -ом году озерных вод, не достигнувшая насыщения (в нашем случае 350 ‰), вычисляется по формуле:

$$s_t = \frac{M_t}{w_t}, \quad (4)$$

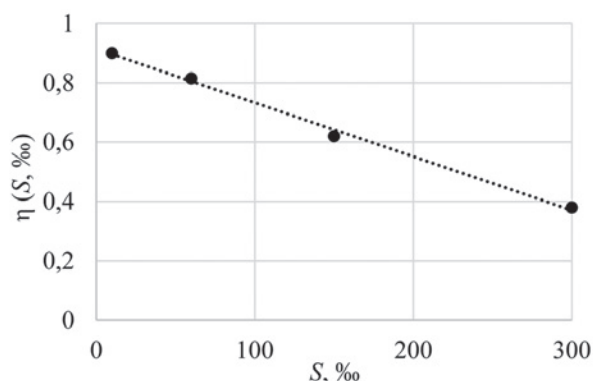
где  $w_t$  – объем воды в озере, приближенно;  $w_t = 0,0673 h_t^2 - 30,086 h_t + 3361,5$ .

Влияние солености озерных вод на испарение с акватории оценивается величиной коэффициента  $\eta(s)$ , изменяющегося от 1,0 для пресной воды до 0,35 для состояния насыщения (рис. 3).

При построении зависимости  $\eta(s)$  учитывались также результаты работ [11–15].

Следует отметить, что измерение испарения с озерной акватории представляет сложную задачу, требующую учета внутригодового хода определяющих испарение процессов. Поэтому проведенные в рамках данного исследования расчеты дают только первое приближение, качественное представление о развитии моделируемых процессов – колебаний уровня и минерализации вод озерной системы для различных сценариев водного баланса.

Начальная соленость озерных вод  $s_0$  принималась равной 10 ‰, минерализация коллекторно-дренажных вод – величиной  $s = 4$  ‰ в соответствии с данными полевых измерений 2019–2020 гг.



**Рис. 3.** Зависимость коэффициента испарения  $\eta(S)$  от солености  $S$  ‰: точки – результаты эксперимента (по [10]), линия – линейная аппроксимация зависимости.

Fig. 3. Dependence of evaporation coefficient  $\eta(S)$  on salinity  $S$  ‰: points – experimental results (according to [10]), line – linear approximation of dependence.

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

$$q_t = p_q q_{t-1} + w_t^{(q)}, \quad (5)$$

$$p_t = p_p p_{t-1} + w_t^{(p)}, \quad (6)$$

$$e_t = p_e e_{t-1} + w_t^{(e)}, \quad (7)$$

где  $p_{(*)}$  – параметры авторегрессии;  $w_{(*)}^{(*)}$  – белые шумы, «звездочка» представляет идентификатор соответствующих процессов. Предполагается, что, в общем случае процессы (4) – (6) взаимно коррелированы с коэффициентами взаимной корреляции  $r_{qp}$ ,  $r_{pe}$ ,  $r_{qe}$ . Уравнения (5) – (7) 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.

Чтобы избежать упрощений, сопровождающих получение аналитического решения, система (5) – (7) решалась численно с использованием метода Монте-Карло (метод имитационного моделирования). Информационную основу моделирования составили данные о морфометрии и водном балансе оз. Айдар-Тузкан.

При стационарном климате и стационарном техногенном воздействии на водный баланс озера, колебания уровня воды, рассматриваемые в достаточно длительном интервале времени, происходят относительно некоторой отметки  $h^*$ , которую принято называть равновесной (или «уровнем тяготения»):

$$h^* = \frac{\langle q \rangle - a(\langle e \rangle - \langle p \rangle)}{be}, \quad (8)$$

где  $b$  – числовой коэффициент из линейной аппроксимации зависимости площади акватории от уровня воды в озере (1), имеющий смысл изменения площади озерной акватории при изменении уровня водоема на 1 м;  $\langle q \rangle$  – матема-

тическое ожидание (м.о.) суммарного притока в озеро, угловые скобки здесь и в дальнейшем означают операцию статистического усреднения;  $\langle e \rangle - \langle p \rangle$  – разность м.о. слоев испарения и осадков по акватории, обычно называется эффективным испарением;  $a$  – числовой коэффициент из зависимости (1). Для озер аридной и полуаридной зон испарение превышает осадки,  $\langle e \rangle - \langle p \rangle > 0$ .

Одна из основных характеристик многолетнего уровня озера – параметр инерционности колебаний уровня  $\alpha$ , название, принятое советскими и российскими специалистами:

$$a = \frac{b\langle q \rangle}{(F^*)^2} = \frac{b(\langle a \rangle - \langle p \rangle)}{F^*}. \quad (9)$$

Математически строго выражение (8) получено С.В. Музылевым [6]. Формула (8) связывает морфометрию и составляющие водного баланса озера – притока в водоем, осадков и испарения по акватории. Применительно к моделированию многолетних колебаний уровня оз. Айдар-Тузкан, в силу нормализации его колебаний уровня вследствие малости параметра инерционности  $a$ , процессы (5) – (7) принимаются гауссовыми.

Моделирование марковских последовательностей (6) и (7) с заданными статистическими характеристиками (средними, дисперсиями, коэффициентами авто- и взаимной корреляции) проводилось на основе метода, изложенного в [16]. Для применения этого метода необходимо получить оценки статистических характеристик (средних, дисперсий, коэффициентов авто- и взаимной корреляции) по рядам наблюдаемых данных.

Атмосферные осадки на зеркало озера, согласно предшествующим исследованиям [2], составляли в среднем 8 % от приходной части водного баланса, в отдельные годы их доля увеличивалась до 20 %. Подземный приток по данным исследований «Средазгипроводхлопка» оценивался в 0,7 % приходной части водного баланса [3]. Основная составляющая расходной части водного баланса – испарение, подземный отток соответствует величине подземного притока, поэтому эту составляющую в расчетах водного баланса не учитывали.

Над крупными водоемами количество осадков может уменьшаться из-за образования устойчивой стратификации, следовательно, при использовании данных наземных метеостанций необходимо выполнять коррекцию [17]. В наличии имелись ряды ежедневных сумм осадков по пяти метеостанциям: Галляарал (571 м абс), Джизак (345 м абс), Дустлик (272 м абс), Янгикишлак (514 м абс) за период 1970–1975 гг. и Западный Арнасай (250 м абс) с июня 2012 г. (рис. 1). Последний пункт имеет первостепенное значение из-за своего расположения, полученные с него данные являются наиболее репрезентативными для условий над водоемом, причем не только в отношении осадков. Сравнение с данными измерений осадков на перечисленных выше наземных метеостанциях за период синхронных наблюдений выявило, что на метеостанции Западный Арнасай их количество на 27–42 % меньше. Для приведения ряда осадков Западного Арнасай к многолетнему периоду использованы данные метеостанции Янгикишлак:  $y = 0,6912x + 7,7005$  (коэффициент корреляции значим при  $p = 0,05$ ). Для остальных метеостанций коэффициент

корреляции не значим. Восстановленные значения проверены по данным [3]: ряд среднегодовых сумм осадков за период 2000–2010 гг. по метеостанциям Машикудук, Нурота, Джизак, Дустлик и Янгикишлак имеет коэффициент корреляции с восстановленным рядом по Западному Арнасаю 0,76, что значимо для  $p = 0,01$ .

Приток коллекторно-дренажных вод является в настоящее время первой по значимости компонентой приходной части водного баланса<sup>2</sup>. В работе использована информация о годовом коллекторном притоке каналов Акбулак, Клы, Пограничный и ЦГК по данным для замыкающих створов Управления мелиорации Министерства водного хозяйства Республики Узбекистан.

Расчет испарения производили по формуле ГГИ [17], для оценки адекватности полученных результатов использованы данные наземных испарителей на станциях Галляарал, Дагбит, Тюябугуз и Чимкурбан. Рекомендованный в Указаниях по расчету испарения [17] метод приведения данных наземных метеостанций к условиям над водной поверхностью при сравнении с данными метеостанции Западный Арнасай не дал удовлетворительных результатов. Поэтому расчет испарения для периода отсутствия данных метеостанции Западный Арнасай (до 2013 г.) выполнен по комбинированным метеоданным, полученным авторами. Среднемесячная температура воздуха над водоемом принята по средней температуре на станциях Джизак и Дустлик, поскольку ее значения практически совпадают с измерениями на Западном Арнасае ( $r = 0,99$ ,  $n = 91$ ). Использована скорость ветра со станции Янгикишлак ( $r = 0,4$ ,  $n = 91$ ), а влажность воздуха рассчитана как среднее парциальное давление водяного пара на станциях Галляарал, Янгикишлак, Джизак и Дустлик. Использована температура воды г/п Западный Арнасай с введением поправок, рекомендованных в [15].

В итоге за период наблюдений на Западном Арнасае (2013–2019 гг.) расчетная величина слоя испарения по данным метеостанции составила в среднем 1098 мм, расчет по комбинированным данным за этот же период – 1102 мм. По наблюдениям на испарителях на станциях Галляарал, Дагбит, Тюябугуз и Чимкурбан за 2013–2019 гг. испарение составило 1284, 1167, 993 и 1314 мм соответственно. Следовательно, предложенный расчетный метод удовлетворительно воспроизводит величину потерь воды на испарение. Отличающееся значение по данным метеостанции Чимкурбан связано с большой удаленностью испарителя к югу от района исследований.

Значения годового водного баланса для периода 2007–2018 гг., рассчитанные с использованием полученных рядов осадков и притока, приведены в табл. 1. Зависимости площади и объема озерной системы от уровня воды (по данным г/п Западный Арнасай) получены по результатам обработки батиметрической съемки в 2019 г. Большие невязки в некоторые годы связаны, вероятнее всего, с неточным определением перетока воды через плотину из Верхне-Арнасайского водохранилища и погрешностями учета коллекторно-дренажных вод в близких к устьям каналов створах [18].

<sup>2</sup> Экспедиционное обследование Айдаро-Арнасайской системы озер в период с 21 сентября по 5 октября 2011 года. НИЦ МКВК, Госкомприроды, Институт зоологии АН РУз. Ташкент, 2011. 77 с.

**Таблица 1.** Годовые значения составляющих водного баланса системы озер Айдар-Тузкан за период 2007–2017 гг.

Table 1. Annual values of the water balance components of the Aidar-Tuzkan lakes system for the 2007–2017 period

| Год  | КДВ, км <sup>3</sup> | АО, км <sup>3</sup> | Е, км <sup>3</sup> | ВAB, км <sup>3</sup> | $\Sigma\P-\Sigma P$ | $\Delta W$ , 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; ВAB – переток из Верхне-Арнасайского водохранилища;  $\Delta W$  – изменение объема воды в системе;  $\Sigma\P-\Sigma P$  – разность приходных и расходных компонентов баланса; N – невязка баланса.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Применение описанного выше метода к моделированию составляющих водного баланса оз. Айдар-Тузкан дает последовательности годовых величин притока коллекторно-дренажных вод, осадков и испарения по акватории озера. Смоделированные последовательности составляющих водного баланса имеют статистические характеристики, совпадающие с величинами, полученными по натурным данным (табл. 2). Расчеты среднегодового уровня воды проведены в допущении, что при снижении уровня не будет происходить отсечения заливов и котловин, т. е. будет сохраняться водообмен между котловинами Айдар и Тузкан. Для озера Айдар-Тузкан, применительно к водному балансу в табл. 2,  $a = 0,08 \text{ год}^{-1}$ . Для сравнения, этот параметр для Каспийского моря в бессточном режиме (при отсеченном заливе Кара-Богаз-Гол) равен  $0,03 \text{ год}^{-1}$ . Прогноз выполнен при наиболее неблагоприятном сценарии: при отсутствии притока воды из Верхне-Арнасайского водохранилища. Начальное положение уровня принято равным среднегодовому на 2019 г. На рис. 4 представлены результаты расчетов уровня воды системы озер Айдар-Тузкан. Площадь акватории, отвечающая равновесной отметке уровня  $h^*$ ,  $F^* = F(h^*)$ , называется равновесной. Для водного баланса озера, представленного в табл. 2,  $h^* = 238,6 \text{ м}$ ,  $F^* = 2071 \text{ км}^2$ .

Внедрение водосберегающих технологий и прогрессивной техники полива в сельском хозяйстве (ст. 50 Закона о воде и водопользовании Узбекиста-

на), поощряемые налоговыми и кредитными льготами, замена производимых сельхозкультур могут привести к сокращению притока коллекторно-дренажных вод и обмелению озера. Поэтому в прогнозные сценарии включили уменьшение притока на  $0,5 \text{ км}^3$ . С другой стороны, гидротехническое строительство в верхней части бассейна Сырдарьи может повлечь изменение внутригодового притока к Шардарьинскому водохранилищу, а именно увеличение зимнего стока, что наоборот, может стать причиной увеличения сбросов в Верхне-Арнассайское водохранилище и усиления перетока воды в систему Айдар-Тузкан. Поэтому дополнительно было рассмотрено увеличение притока на  $0,5 \text{ км}^3$ .

Статистический анализ рядов не выявил значимых трендов метеорологических характеристик по имевшимся рядам наблюдений, поэтому климатический форсинг в модели отсутствовал.

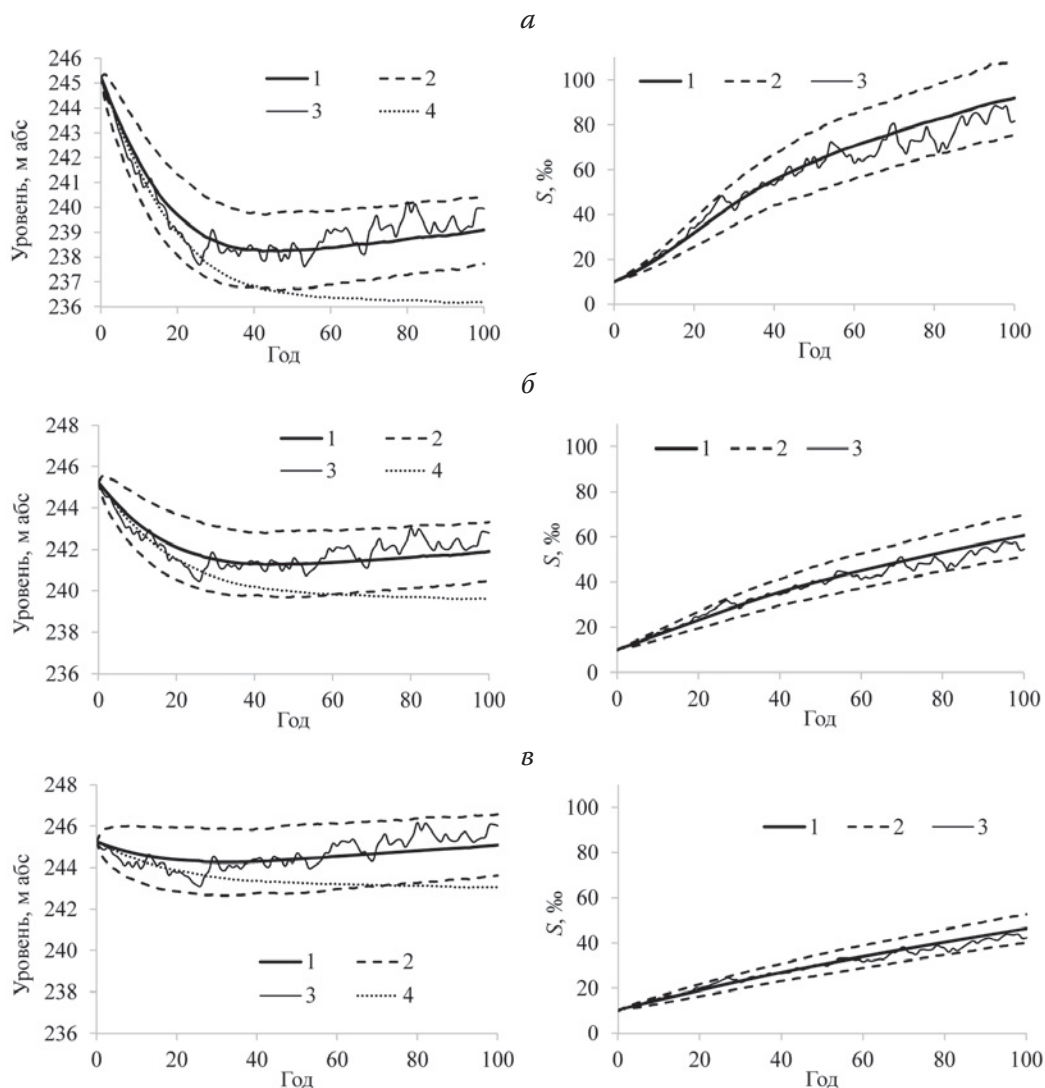
**Таблица 2.** Выборочные оценки статистических характеристик составляющих водного баланса оз. Айдар-Тузкан по интервалу 1995–2017 гг.  
Table 2. Selective estimates of statistical characteristics of the components of the lake Aidar-Tuzkan water balance in the 1995–2017 interval

| Составляющие водного баланса                               | Характеристики составляющих водного баланса |           |                            |                                           |        |           |
|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------|----------------------------|-------------------------------------------|--------|-----------|
|                                                            | Среднее                                     | Дисперсия | Коэффициент автокорреляции | Матрица коэффициентов взаимной корреляции |        |           |
|                                                            |                                             |           |                            | Приток КДВ                                | Осадки | Испарение |
| Приток коллекторно-дренажных вод, $\text{км}^3/\text{год}$ | 2,20                                        | 0,160     | 0,52                       | 1,00                                      | 0,20   | 0,0       |
| Осадки, м/год                                              | 0,25                                        | 0,041     | 0,14                       |                                           | 1,00   | 0,0       |
| Испарение, м/год                                           | 1,30                                        | 0,019     | 0,28                       |                                           |        | 1,00      |

На рис. 4 хорошо видно влияние на ход м.о. уровней зависимости испарения с озерной акватории от солености вод озера. Отметим, что на рис. 4 приведены примеры возможного хода реальных уровней и солености, изменяющихся почти полностью в пределах 95 % доверительных интервалов (выход за пределы этих интервалов допустим, но не должен превышать 5 %). При этом реальные уровни и солености могут заметно отличаться от их математического ожидания.

Максимальная разность 3,1 м между уровнями, рассчитанными с учетом и без учета солености вод озера, влияющей на испарение, достигается для варианта с минимальным средним притоком коллекторно-дренажных вод, равным  $1,7 \text{ км}^3/\text{год}$  (рис. 4а, графики уровней). При среднем притоке, равном  $2,7 \text{ км}^3/\text{год}$  (рис. 4в, графики уровней) аналогичная разность между уровнями с учетом и без учета солености составляет около 2 м, причем диапазон изменения м.о. уровня для соленого озера всего около 1 м.

При сохранении современного среднего притока коллекторно-дренажных вод  $2,2 \text{ км}^3/\text{год}$ , уровень воды в озере в перспективе будет иметь равновесную



**Рис. 4.** Характеристики уровня и солености воды в оз. Айдаркуль для вариантов среднего притока коллекторно-дренажных вод: *а* –  $1,7 \text{ км}^3/\text{год}$ ; *б* –  $2,2 \text{ км}^3/\text{год}$ ; *в* –  $2,7 \text{ км}^3/\text{год}$ . На графиках: 1 – математические ожидания (м.о.) уровня и солености; 2 – границы 95 % доверительных интервалов для м.о. уровня и солености; 3 – примеры реализаций уровня и солености озера; 4 – м.о. уровня без учета влияния солености на испарение. Статистические характеристики осадков и испарения по акватории озера приняты одинаковыми для всех вариантов расчетов (см. табл. 2).

Fig. 4. Characteristics of water level and salinity in Lake Aidarkul for variants of average collector-drainage water inflow: *a* –  $1.7 \text{ km}^3/\text{year}$ ; *b* –  $2.2 \text{ km}^3/\text{year}$ ; *v* –  $2.7 \text{ km}^3/\text{year}$ . On the graphs: 1 – mathematical expectations (m.e.) of level and salinity; 2 – limits of 95% confidence intervals for m.e. level and salinity; 3 – examples of lake level and salinity realizations; 4 – m.e. level without considering salinity effects on evaporation. Statistical characteristics of precipitation and evaporation over the lake water area are assumed the same for all variants of calculations (see Table 2).

отметку 241,9 м абс и  $s = 61\%$ . При уменьшении среднего притока до  $1,7 \text{ км}^3/\text{год}$  – равновесный уровень снижается до отметки 239 м абс,  $s$  увеличивается до  $92\%$ . При увеличении притока до  $2,7 \text{ км}^3/\text{год}$  изменения уровня и  $s$  по отношению к современным величинам будут минимальными – равновесная отметка уровня – 245,1 м абс,  $s = 46\%$ .

Результаты расчетов показывают зависимость солености озерной воды от величины среднего притока коллекторно-дренажных вод: чем меньше эта величина, тем больше соленость вод озера.

Обсыхание значительных площадей солоноватого озера, являющегося приемником коллекторно-дренажных вод, может повлечь проблемы, аналогичные ситуации в Приаралье, а именно – изменение климата прибрежных территорий, пыльные бури, разносящие песок с накопленными загрязняющими веществами, рост респираторных, офтальмологических и онкологических заболеваний. Исследование системы озер является актуальной проблемой для научного сообщества Узбекистана. В работе [19] подчеркивается, что для стабилизации режима озерной системы в современном состоянии необходимы ежегодные сбросы воды из Шардарьинского водохранилища в размере  $1,5\text{--}1,7 \text{ км}^3$ .

В качестве альтернативы предложенному способу моделирования следует упомянуть и другие методы расчета составляющих водного баланса. Для их определения необходимо использовать данные климатических прогнозов сумм осадков, температуры воздуха и скорости ветра. Основная проблема данного подхода состоит в том, что для расчета слоя испарения нужно знать показатели температуры поверхности воды водоема, следовательно, для соответствия ее значений ожидаемым климатическим изменениям следует дополнительно привлекать модели, воспроизводящие гидрологический режим водоемов [20]. Таким образом, необходимо выбрать и откалибровать модель по данным натурных измерений, которые имеются далеко не для всех водоемов. Данный подход, например, был реализован для Ладожского и Онежского озер [21], Великих американских озер с использованием климатических и гидрологических моделей [22], а также в ряде работ, посвященных прогнозам изменения режима озер и водохранилищ, например в [23, 24]. При разработке надежной откалиброванной модели для исследуемого объекта данный подход расширит возможности перспективного определения уровня режима с применением прогнозов по различным климатическим и водохозяйственным сценариям.

## ВЫВОДЫ

Отделение Верхне-Арнасайского водохранилища привело с 2006 г. к наступлению регрессивной фазы уровня воды искусственно созданной системы озер Айдаркуль-Тузкан. При сохранении объема притока коллекторно-дренажных вод и отсутствии значительных изменений климата региона за 100-летний период можно ожидать снижения равновесного уровня до отметки около 241,9 м абс, что почти на 3 м ниже современной отметки. При этом площадь акватории уменьшится примерно на  $16\%$ . Положение уровня, как следует из результатов расчетов, может заметно отличаться от его математического ожидания (до 1,5 м при  $95\%$  доверительном интервале).

Сценарные расчеты показали, что при сокращении притока на  $0,5 \text{ км}^3/\text{год}$  равновесный уровень снизится на 6 м, что весьма вероятно при внедрении водосберегающих технологий и прогрессивной техники полива в сельском хозяйстве Узбекистана. Увеличение притока коллекторно-дренажных вод на  $0,5 \text{ км}^3/\text{год}$  в случае увеличения площади орошаемых земель приведет к снижению равновесного уровня в первые десятилетия на 1 м. К концу столетнего периода при этом сценарии уровень воды вернется к современной отметке, при этом ее соленость увеличится в четыре раза по сравнению с начальной 10 ‰.

Для решения проблемы обсыхания, эолового выноса солей и стабилизации уровня режима необходимо продолжать регулярную подпитку системы озер Айдаркуль-Тузкан водой из Шардаринского водохранилища через Верхне-Арнасайское водохранилище.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Видинеева Е.М. Гидрохимический режим и солевой баланс некоторых водохранилищ Средней Азии: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Ташкент: ТашГУ, 1974. 188 с.
2. Горелкин Н.Е. Гидрометеорологический, гидрохимический режим и прогноз водно-солевого баланса Арнасайской озерной системы: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Ташкент: ТашГУ, 1985. 164 с.
3. Горелкин Н.Е., Никитин А.М. Водный баланс Арнасайской озерной системы // Труды САРНИГМИ. 1976. Вып. 39(120). С. 76–93.
4. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов, прогноз и управление. М.: Мир, 1974. Вып. 1. 406 с.
5. Привальский В.Е., Панченко В.А., Асарина Е.А. Модели временных рядов. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 226 с.
6. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Колебания уровня замкнутых водоемов // Труды Гидропроекта. Энергия. 1964. Сб. 12. С. 29–61.
7. Музылев С.В., Привальский В.Е., Раткович Д.Я. Стохастические модели в инженерной гидрологии. М.: Наука, 1982. 283 с.
8. Румянцев В.А., Трапезников Ю.А. Стохастические модели гидрологических процессов. М.: Наука, 2008. 152 с.
9. 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.
10. Бобров С.Б. Испарение морской воды в зависимости от солёности // Труды института океанологии. 1960. Т. 37. С. 161–163.
11. Багров Н.А. О колебаниях уровня бессточных озер // Метеорология и гидрология. 1963. № 6. С. 41–46.
12. Буиневич Д.В., Буйневич Н.А. Испарение с поверхности залива Кара-Богаз-Гол // Метеорология и гидрология. 1963. Т. 95. Вып. 5. С. 459–460.
13. Миронова Н.Я. Водный баланс залива Кара-Богаз-Гол // Труды института океанологии. 1960. Т. 37. С. 110–122.
14. Панин Г.Н., Брезгунов В.С. О влиянии солёности воды на ее испарение // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 5. С. 718–720.
15. 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.
16. 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.
17. Кузнецов В.И., Голубев В.С., Федорова Т.Г. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 85 с.
18. Чембарисов Э.И., Махмудов И.Э., Лесник Т.Ю., Беликов И.В., Вахидов Ю.С. Гидрологический и гидрохимический режимы коллекторно-дренажных вод, выпадающих в Айдаро-Арнасайскую озёрную систему // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2016. № 1(61). С. 191–196.

19. Туйназарова И. А, Тошпулатова С.А. Оценка современного состояния Айдаро-Арнасайской системы озер и возможные изменения гидрометеорологического режима на перспективу // Дальневосточная весна – 2018: мат-лы 16-й Межд. научно-практ. конф. по проблемам экологии и безопасности. Комсомольск-на-Амуре, 2018. С . 288–292.
20. Гречушникова 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.
21. Rukhovets L.A., Filatov N.N. Ladoga and Onega – Great European Lakes: Observation and Modeling, Springer-Praxis Publishing, 2010, 320 p.
22. 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.
23. Гречушникова М.Г. Возможные климатические изменения гидрологического режима в долинных водохранилищах // Метеорология и гидрология. 2012. № 10. С. 71–80.
24. Su D., Hu X., Wen L., Lyu S., Gao X., Zhao L., Li Zh., Du J., Kirillin G. Numerical study on the response of the largest lake in China to climate change // Hydrology and Earth System Sciences. 23. 2093-2109. 10.5194/hess-23-2093-2019.

## REFERENCES

1. Vidineyeva E.M. Hydrochemical regime and salt balance of some reservoirs of Central Asia. Avtoref. diss.... kand geogr. nauk. Tashkent: TashGU, 1974. 188 p. (In Russ.).
2. Gorelkin N.E. Hydro/meteorological, hydrochemical regime and a forecast of the water/saline balance of the Arnasay lake system. Avtoref. diss.... kand geogr. nauk. Tashkent: TashGU, 1985. 164 p. (In Russ.).
3. Gorelkin N.E., Nikitin A.M. The Arnasay lake system water balance. *Proceedings of SARNIGMI*. 1976. Vyp. 39(120). P. 76–93 (In Russ.).
4. Box G., Jenkins F. Analysis of time series, forecast and management. M.: Mir, 1974. Vyp. 1. 406 p. (In Russ.).
5. Privalskiy V.E., Panchenko V.A., Asarina E.A. Models of time series. SPb.: Gidrometeoizdat, 1992. 226 p. (In Russ.).
6. Kritskiy S.N., Menkel M.F. Closed water bodies' level fluctuations. *Hydroproject proceedings. Energia*. 1964. Collection 12. P. 29–61 (In Russ.).
7. Muzilev S.V., Privalskiy V.E., Ratkovich D.Y. Stochastic models in engineering hydrology. M.: Nauka, 1982. 283 p. (In Russ.).
8. Runyantsev V.A., Trapeznikov Y.A. Stochastic models of hydrological processes. M.: Nauka, 2008. 152 p. (In Russ.).
9. Sanin M.V., Alisherov N.B., Frolov A.V. Dynamic/stochastic simulation of the processes of internal drainage water bodies' filling. *DAN SSSR*. 1991. Vol. 316. No. 6. P. 1472–1475 (In Russ.).
10. Bobrov S.B. Sea water evaporation depending on salinity. *Proceedings of the Institute of Oceanology*. 1960. Vol. 37. P. 161–163 (In Russ.).
11. Bagrov N.A. About fluctuations of the internal-drainage lakes' level. *Meteorology and hydrology*. 1963. No. 6. P. 41–46 (In Russ.).
12. Buynevich D.V., Buynevich N.A. Evaporation from the Kara-Bogaz-Gol Bay surface. *Meteorology and hydrology*. 1963. Vol. 95. Vyp. 5. P. 459–460 (In Russ.).
13. Mironova N.Y. The Kara-Bogaz-Gol Bay water balance. *Proceedings of the Institute of oceanology*. 1960. Vol. 37. P. 110–122 (In Russ.).
14. Panin G.N., Brezgunov V.S. About the water salinity impact on its evaporation. *Izvestia RAN. Fizika atmosfery i okeana. News bulletin of RAS. Physics of the atmosphere and the ocean*. 2007. Vol. 43. No. 5. P. 718–720 (In Russ.).
15. Frolov A.V., Vyruchalkina T.Y., Sarkisyan S.G. Modelling of water/salinity balance of the Lake Bolshoy Yashaltinskiy. *Water resources*. 2018. Vol. 45. No. 3. P. 1–9 (In Russ.).
16. Frolov A.V., Vyruchalkina T.Y., Solomonova I.V. Modelling of non-Gaussian random process in application to hydrology. *Water resources*. 2014. Vol. 41. No. 6. P. 1–6 (In Russ.).
17. Kuznetsov V.I., Golubev V.S., Fedorova T.G. Guidelines on calculation of evaporation from a water body surface. L.: Gidrometeoizdat, 1969. 85 p. (In Russ.).

18. Chembarisov E.I., Makhmudov I.E., Lesnik T.Y., Belikov I.V., Vakhidov Y.S. Hydrological and hydrochemical regimes of collector-drainage waters inflowing into the Aydar-Arnasay lake system. *The ways of increasing the effectiveness of irrigated farming*. 2016. No. 1(61). P. 191–196 (In Russ.).
19. Tuynazarova I.A., Toshpulatova S.A. Assessment of the Aydar-Arnasay lake system current state and possible changes of the hydro/meteorological regime in the prospect. *Far-Eastern Spring-2018. Proceedings of 16th International scientific-practical conference on the problems of ecology and safety*. Komsomolsk-on-Amur. 2018. P. 288–292 (In Russ.).
20. Grechushnikova M.G. Results of numerical modelling of the Mozhaysk and Istra reservoirs regime changes in case of implementation of A2 scenario of global warming. *Meteorology and hydrology*. 2014. No. 3. P. 86–96 (In Russ.).
21. Rukhovets L.A., Filatov N.N. Ladoga and Onega – Great European Lakes: Observation and Modeling, Springer-Praxis Publishing, 2010, 320 p.
22. 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.
23. Grechushnikova M.G. Possible climate changes of hydrological regime in valley reservoirs. *Meteorology and hydrology*. 2012. № 10. C. 71–80.
24. Su D., Hu X., Wen L., Lyu S., Gao X., Zhao L., Li Zh., Du J., Kirillin G. Numerical study on the response of the largest lake in China to climate change. *Hydrology and Earth System Sciences*. 23. 2093–2109. DOI: 10.5194/hess-23-2093-2019.

#### Сведения об авторах:

**Гречушникова Мария Георгиевна**, канд. геогр. наук, ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук», Россия, Москва, ул. Губкина д. 3; географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»; ORCID: 0000-0001-6376-2473; e-mail: allavis@mail.ru

**Фролов Анатолий Васильевич**, д-р техн. наук, ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук», Россия, Москва, ул. Губкина д. 3; ORCID: 0000-0002-0944-0526; e-mail: anatolyfrolov@yandex.ru

**Айбулатов Денис Николаевич**, канд. геогр. наук, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»; ORCID: 0000-0002-0180-8496; e-mail: gidroden@mail.ru

#### About the authors:

**Maria G. Grechushnikova**, Candidate of Geographical Sciences, Institute of Water Problems of the Russian Academy of Science, Moscow, Gubkina st. 3; Geographical faculty of Moscow State University, Moscow, Russia; ORCID: 0000-0001-6376-2473; e-mail: allavis@mail.ru

**Anatoliy V. Frolov**, Doctor of Technical Sciences, Institute of Water Problems Russian Academy of Science, Moscow, Gubkina st. 3; ORCID: 0000-0002-0944-0526; e-mail: anatolyfrolov@yandex.ru

**Denis N. Aybulatov**, Candidate of Geographical Sciences, Geographical faculty of Moscow State University, Moscow, Russia; ORCID: 0000-0002-0180-8496; e-mail: gidroden@mail.ru