

УДК 556.18

## ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВОДОТОКОВ И ПРОБЛЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ КАЛМЫКИЯ

О.М. Пахомова<sup>1</sup>, В.Ю. Григорьев<sup>2</sup>, А.А. Сазонов<sup>3</sup>, Е.С. Пováлишникoва<sup>4</sup>, Н.Л. Фролова<sup>5</sup>

<sup>1-5</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши*

<sup>2-3</sup> *Институт водных проблем Российской академии наук*

<sup>1</sup> *Науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: olpah@mail.ru*

<sup>2</sup> *Мл. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: vadim308g@mail.ru*

<sup>3</sup> *Ст. преподаватель, канд. геогр. наук; e-mail: sazonov.lesha@gmail.com*

<sup>4</sup> *Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: elenapovalishnikova@gmail.com*

<sup>5</sup> *Проф., д-р геогр. наук; e-mail: frolova\_nl@mail.ru*

Постоянный дефицит пресной воды для питьевого и коммунально-бытового использования в Республике Калмыкия в последнее время ощущается критически остро. Это связано как с природными факторами (увеличивающейся засушливостью климата, ограниченностью запасов пресных поверхностных и подземных вод, отсутствием достаточно протяженных участков крупных рек с постоянным стоком), так и с изношенностью гидротехнических сооружений. Эксплуатация подземных вод на существующих месторождениях привела к их истощению и ухудшению качества, при этом крупные месторождения пресных и слабосоленоватых подземных вод юга Прикаспия невозможно использовать из-за повышенного содержания в них загрязняющих веществ. Ремонт старых и строительство новых водоводов от р. Волги требуют постоянных значительных финансовых вложений федерального уровня, поэтому в последние годы активно обсуждается новый способ увеличения запаса пресных вод, пригодных для питьевого водоснабжения, – искусственное пополнение подземных вод (ИППВ). В статье дается современная оценка водных ресурсов малоизученного поверхностного стока рек Калмыкии, рассмотрены возможность и целесообразность создания инфильтрационных бассейнов для пополнения запасов подземных вод, рассчитаны параметры и режим работы пяти планируемых бассейнов.

Основным источником пресных поверхностных вод в Калмыкии являются реки Ергенинской возвышенности, среднегодовалый современный сток с восточного склона которой оценен в 0,120 км<sup>3</sup>/год, с западного – в 0,105 и с южного – в 0,045 км<sup>3</sup>/год. Установлены тенденции современного изменения гидрологического режима рек под влиянием изменений климата: сокращение годового стока и его внутригодовое перераспределение с сокращением весеннего половодья, незначительным ростом зимнего стока и выравниванием летнего меженного. Расчет режима функционирования планируемых инфильтрационных бассейнов позволил сделать следующие выводы: максимально возможный объем суммарной инфильтрации в них составит около 923 тыс. м<sup>3</sup>/год, что в 8,7 раза меньше современного водозабора из Троицкого и Баярнинского месторождений для водоснабжения населения республики; достаточно эффективная работа бассейнов возможна только при ежегодной очистке водохранилищ-отстойников от накапливающихся иловых отложений, в противном случае коэффициент фильтрации грунтов будет сокращаться, что приведет к снижению инфильтрационного питания в десятки раз. Таким образом, ИППВ могут быть только временной мерой, восполняющей снижение уровня грунтовых вод, до реконструкции и строительства новых водоводов от Волги для обеспечения водоснабжения Элисты и окрестностей питьевой водой приемлемого качества.

**Ключевые слова:** водные ресурсы, подземные воды, Ергенинская возвышенность, искусственные инфильтрационные бассейны, скорость инфильтрации, расчет гидрографа, изменение климата

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.1

### ВВЕДЕНИЕ

Республика Калмыкия (РК) большей частью расположена в Прикаспийской низменности, на за-

паде – частично на Ергенинской возвышенности, выполняющей роль водораздела между бассейнами Дона и Каспийского моря. Ширина возвышенности

на территории РК составляет 50–80 км. В среднем абсолютные высоты составляют около 120–140 м, возрастая на юге до 218 м. В пределах республики выделяются четыре природные зоны: степная – 0,24 млн га, сухостепная – 2,18 млн га, полупустынная – 2,93 млн га, пустынная – 2,24 млн га. Это один из самых засушливых регионов страны. В пределах РК проживает 264 210 чел. (на 2023 г.), из которых около 103 тыс. – в г. Элисте.

Гидрологический режим водотоков РК слабо изучен, что связано, главным образом, с отсутствием постоянных водотоков, сток которых мог бы использоваться для водоснабжения. Значительная часть территории РК зачастую отмечается как не имеющая поверхностного стока [Водные ресурсы России..., 2008; Гидрохимический сток рек..., 2020]. Всего на территории РК имеется 313 водных объектов, из них 144 водохранилища, 139 прудов, 11 противопаводковых сооружений, 15 озер, имеющих комплексное хозяйственное значение, четыре накопителя сточных вод [Габунщин, 2009].

Преобладающее количество водных ресурсов в регионе сосредоточено в озерах: Маныч-Гудило, Ханата, Сарпа, Деед Хулсун, Состинских, являющихся приемниками сточных вод, поэтому вода в них не пригодна для питьевого водоснабжения [Хочаева, Васильева, 2017]. На территории Калмыкии 43 малых водотока, суммарной протяженностью 2078 км, а также средние и большие реки, такие как Кума, Маныч и др., общей протяженностью 520 км. Гидрографическая сеть РК развита очень слабо. На севере модуль стока левобережных притоков Дона составляет 0,5–1,0 л/с·км<sup>2</sup>. Южнее из-за сухого и жаркого климата модуль стока уменьшается до 0, часто наблюдается пересыхание водотоков, стекающих со склонов Ергенинской возвышенности. Реки восточной части РК относятся к бассейну Волги. На юго-западе водотоки относятся к бассейнам Кумы и Маныча. Гидрографическая сеть по территории республики распределена неравномерно: основная часть водотоков сосредоточена на западе Калмыкии и стекает с восточных склонов Ергенинской возвышенности (рис. 1). Небольшие водотоки, стекающие по многочисленным балкам Ергенинской возвышенности, образуют лиманы, зачастую летом пересыхающие. Главными искусственными водными магистралями являются Кумо-Манычский и Черноземельский каналы, используемые для переброски стока рек. Суммарная водосборная площадь в пределах территории Калмыкии составляет 74,8 тыс км<sup>2</sup>.

Гидрологическая изученность района чрезвычайно слабая, в настоящее время действует один гидрологический пост, расположенный в балке

Амта-Бургуста в поселке Кетченеры (см. рис. 1), в остальных районах Калмыкии, в том числе на территории Прикаспийской низменности, на озерах и в крупных городах наблюдения не ведутся.

Централизованное хозяйственно-питьевое водоснабжение населения РК осуществляется за счет подземных и поверхностных вод. Основная доля поверхностного стока формируется в реках с площадью водосбора 30–780 км<sup>2</sup> и длиной 20–60 км и балках (их около 40) на восточной части Ергенинской возвышенности. По предварительным данным в 2022 г. доля подземных вод (ПВ) в балансе хозяйственно-питьевого водоснабжения в РК составила 57,2%, в г. Элисте – 63,9% [Справка..., 2023]. Прогнозные ресурсы подземных вод в РК составляют 1,6 млн м<sup>3</sup>/сут, из которых 69,4 тыс. м<sup>3</sup>/сут (4,2%) разведаны [Махота, Ершов, 2010]. Добыча подземных вод в РК достигает 24,8 тыс. м<sup>3</sup>/сут. В 2017 г. в РК превышение гигиенических нормативов по санитарно-химическим показателям отмечалось в 35,7% проб воды из водоемов первой категории водопользования, используемых в качестве источников питьевого и хозяйственно-бытового водопользования, и в 52,3% проб воды из водоемов второй категории, используемых для рекреационных целей. Процент обеспеченности качественным водоснабжением городских жителей в среднем по России – 92,5%, в Калмыкии же этот показатель составляет 0%. В частности, в Элисте минерализация водопроводной воды достигает 2–2,2 г/дм<sup>3</sup> при нормативе для питьевой воды 1 г/дм<sup>3</sup>. Эта вода Роспотребнадзором вынужденно признана питьевой по причине отсутствия иных источников водоснабжения. В 2021 г. питьевой водой приемлемого качества из централизованных систем водоснабжения было обеспечено всего 7,5% населения Калмыкии, учитывая, что по согласованию с Роспотребнадзором для питьевого водоснабжения используются солоноватые воды с минерализацией до 1,5 г/дм<sup>3</sup>.

Хозяйственно-питьевое водоснабжение населения Элисты, в частности, осуществляется подземными водами миоцен-плиоценового (ергенинского) водоносного горизонта водозаборов «Верхнеяшкульский» (Троицкое месторождение подземных вод (МПВ) с дебитом 30 тыс. м<sup>3</sup>/сут) и «Баяртинский» (Баяртинское МПВ с дебитом 20 тыс. м<sup>3</sup>/сут), расположенных к северу от столицы. В 2022 г. суммарная добыча пресных ПВ, извлекаемых на территории РК, составила 23,14 тыс. м<sup>3</sup>/сут, из них на месторождениях – 22,65 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Для водоснабжения Элисты добыча составила 21,6 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Ергенинский водоносный горизонт в пределах РК обладает ре-

сурсами подземных вод в 90 тыс. м<sup>3</sup>/сут при минерализации менее 1 г/дм<sup>3</sup> и 115–145 тыс. м<sup>3</sup>/сут при минерализации от 1 до 1,5 г/дм<sup>3</sup> [Бембеев, Щипицын, 2005; Цуркан, 1993а]. Освоение запасов ПВ в целом по территории РК составляет 39,7%, для г. Элисты – 47,0%. В 2022 г. в ергенинском водоносном горизонте отмечались повышенные величины минерализации (1,1–1,4 ПДК), жесткости (1,3 ПДК), натрия (1,2–2,5 ПДК), хлоридов (1,1–1,9 ПДК), железа (3,0–6,3 ПДК), марганца (7,9 ПДК) [Справка..., 2023].

Основными причинами низкого качества питьевой воды, подаваемой населению, являются: природное загрязнение вод источников питьевого водоснабжения; отсутствие зон санитарной охраны, обустроенных в соответствии с действующими требованиями; недостаточная эффективность технологий обработки воды в связи с отсутствием современного комплекса водоподготовки и обеззараживания; высокая степень износа водоочистных сооружений (установок для забора воды, оборудования насосных станций, станций очистки воды или водоподготовки, водопроводных сетей, резервуаров для обеспечения водой и пр.); ненадлежащее содержание колодцев и каптажей, слабая защищенность подземных водоносных горизонтов от поверхностного загрязнения, сброс неочищенных сточных вод [Схема..., 2014]. Среди источников загрязнения подземных вод в районе Элисты можно отдельно выделить свалки бытовых отходов и поля фильтрации очистных сооружений.

В Прикаспийской части РК сложилась критическая ситуация – распространенные там небольшие линзы пресных и слабоминерализованных подземных вод характеризуются сложными гидрогеологическими условиями залегания, при этом крупные месторождения пресных и слабосоленоватых подземных вод юга Прикаспия невозможно использовать из-за повышенного содержания в них загрязняющих веществ: мышьяка, фенолов, ароматических углеводородов и бора. Использование опреснительных установок для водоснабжения в Калмыкии не получило широкого распространения в основном из-за отсутствия разработанных методик, стоимости опресненной воды и из-за проблем с утилизацией рассолов после опреснения.

Система водоснабжения РК включает в себя ~121 насосную станцию водопровода первого и второго подъемов, пять очистных сооружений водопровода, семь канализационных насосных станций, одно очистное сооружение канализации. Протяженность сетей водоснабжения составляет 1543,92 км. Уровень износа объектов водоснабжения по официальным данным свыше 30%.

Традиционно для пополнения запасов пресных вод в РК использовались водоводы от р. Волги, но из-за сильной изношенности гидротехнических сооружений, протечек и неподконтрольных изъятий стока по пути от Волги до Элисты теряется более 50% подводимого стока [Схема..., 2014]. Стоимость строительства нового водопровода от Волги до Калмыкии оценена в 14 млрд р. [Строительство..., 2022].

В рамках региональной комплексной программы «Чистая вода» на 2009–2022 гг., принятой правительством РК [О региональной..., 2009], было предусмотрено строительство ряда объектов водоснабжения и водоотведения.

Таким образом, вопрос обеспечения населения качественной питьевой водой стоит в республике крайне остро, а современное состояние питьевого водоснабжения РК можно охарактеризовать как критическое. Положение осложняет наблюдающееся изменение климата, которое на территории Калмыкии проявляет себя прежде всего в росте температуры воздуха и сопутствующего увеличению испарения, что очевидно влияет на динамику и высоту снежного покрова, запасы воды в снеге и почве и в итоге отражается на запасах поверхностных и подземных вод.

Исходя из вышеизложенного, была сформулирована следующая цель настоящего исследования: проанализировать основные гидрометеорологические факторы формирования стока и современный гидрологический режим водотоков Ергенинской возвышенности (основных поверхностных источников водоснабжения населенных пунктов Калмыкии) с учетом изменяющегося климата, а также рассмотреть один из возможных вариантов покрытия дефицита водных ресурсов в республике путем формирования искусственных подземных источников водоснабжения как аккумуляторов поверхностного стока.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно имеющимся данным, рост температуры воздуха в регионе начался в первой четверти XX в. [IPCC, 2013]. Потепление проходило в две волны: 1910–1945 гг. и наиболее интенсивное после 1976 г. с периодом относительной стабильности температуры воздуха в 1946–1975 гг. [Ранькова и др., 2014]. Середина 1970-х гг. рассматривалась как годы «климатического сдвига» [Полонский, Башарин, 2008]. Для юго-востока европейской части России наиболее интенсивный рост температуры воздуха начался с конца 1980-х гг. По этой причине оценка изменений метеорологических характеристик проводилась с 1976 г., а их средние значения рассчитывались отдельно для периода до и после 1976 г.

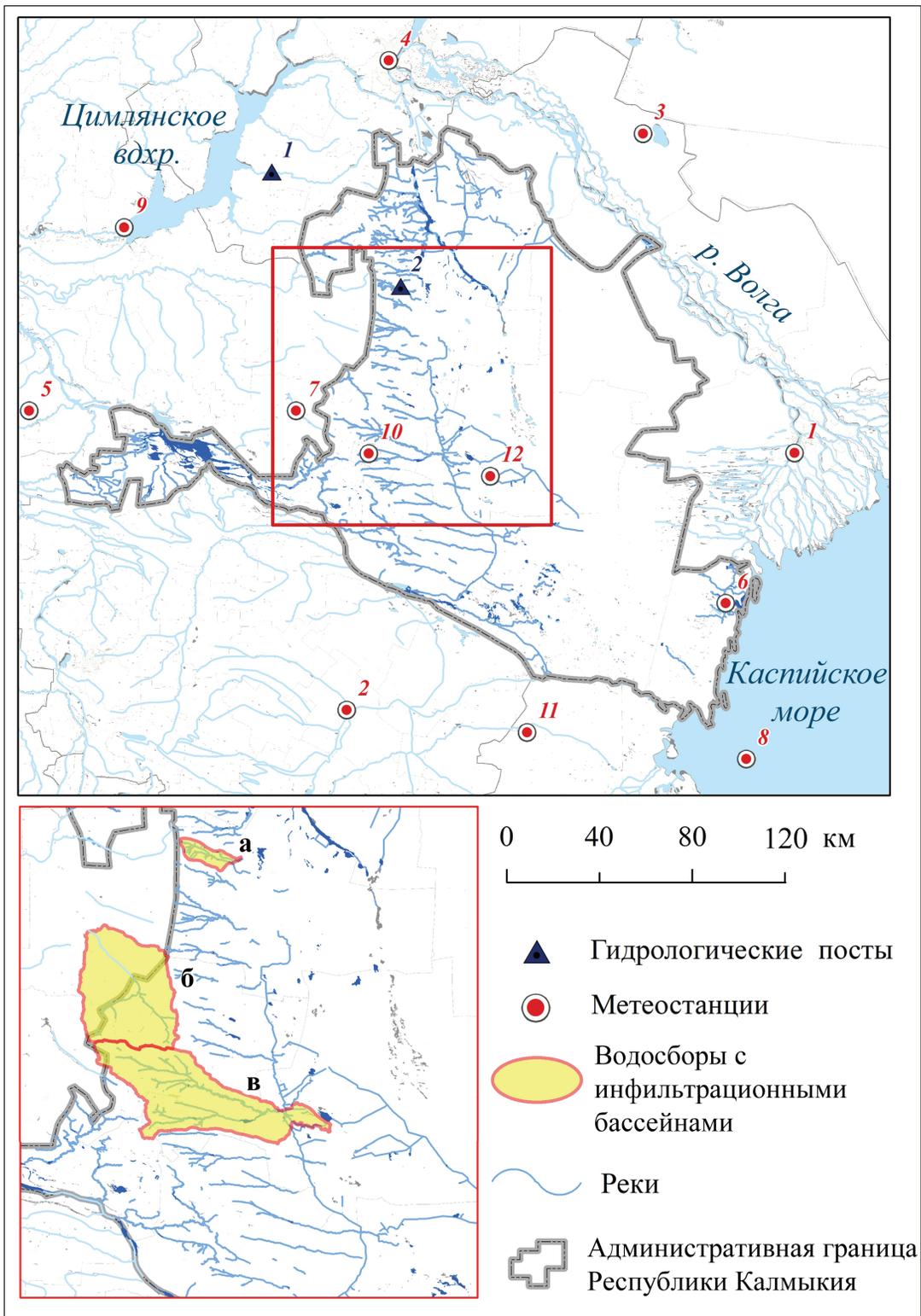


Рис. 1. Гидрографическая сеть Республики Калмыкия с опорными расчетными створами и метеостанциями. Метеостанции: 1 – Астрахань; 2 – Буденновск; 3 – Верхний Баскунчак; 4 – Волгоград; 5 – Гигант; 6 – Лагань; 7 – Ремонтное; 8 – о. Тюлений; 9 – Цимлянск; 10 – Элиста; 11 – Южно-Сухумск; 12 – Яшкуль. Гидрологические посты: 1 – р. Аксай Есауловский – х. Водянский; 2 – р. Амта-Бургуста – п. Кетченеры. Водосборы рек с планируемым инфильтрационными бассейнами: а – р. Амта-Бургуста; б – б. Загиста; в – р. Яшкуль

Fig. 1. Hydrographic network of the Republic of Kalmykia with reference cross-sections and weather stations. Weather stations: 1 – Astrakhan; 2 – Budennovsk; 3 – Upper Baskunchak; 4 – Volgograd; 5 – Giant; 6 – Lagan; 7 – Remontnoe; 8 – Tyulenij Island; 9 – Tsimlyansk; 10 – Elista; 11 – Yuzhno-Sukhumsk; 12 – Yashkul. Hydrological posts: 1 – r. Aksai Esaulovsky – farm Vodyansky; 2 – r. Amta-Burgusta – Ketchenery village. River catchments with planned infiltration basins: а – r. Amta-Burgusta; б – Zagista gulch; в – r. Yashkul

Наиболее важным для формирования водных ресурсов в любом бассейне является период весеннего половодья, основными факторами формирования которого являются запасы воды в снежном покрове, влажность и промерзание почвы, наличие зимних оттепелей и дружность снеготаяния [Варенцова и др., 2022]. Для анализа динамики высоты снежного покрова в РК были выбраны 10 метеостанций с малым числом пропусков в рядах наблюдений за 1976–2020 гг. (см. рис. 1). Поскольку на территории Калмыкии снегомерные съемки не проводятся, запасы воды в снежном покрове были оценены единственно возможным методом – дистанционным, по данным проекта GlobSnow 3 [GlobSnow, 2022]. Однако в условиях неустойчивой, прерываемой оттепелями зимы ошибка определения может возрастать. Чтобы минимизировать возможную величину ошибки анализ был проведен по среднемесячным значениям запасов за февраль и март.

Влажность почвы как характеристика, влияющая на величину потерь стока половодья, анализировалась по данным архива ERA-5 Land, полученным на основе работы модели H-TESSEL и реанализа ERA-5 за 1981–2020 гг. [Hersbach и др., 2020].

Динамика годового и сезонного стоков была проанализирована по данным двух гидрологических постов: на малой реке Амта-Бургуста в одноименной балке и на р. Аксай Есауловский (х. Водянский, 48,0° с. ш., 43,4° в. д.) [Автоматизированная..., 2022]. Амта-Бургуста – малая река в Кетченеровском районе Калмыкии. Берет свое начало в северных Ергенях в балке Амта-Бургуста и течет преимущественно с запада на восток. Теряется у подножия Ергеней на Прикаспийской низменности близ поселка Бургсун. Длина реки – 23 км, площадь водосборного бассейна – 99 км<sup>2</sup>. Река Аксай Есауловский (длина 179 км, площадь бассейна – 2588 км<sup>2</sup>) – левый приток Дона – была выбрана в качестве подходящего по условиям формирования стока и площади бассейна аналога (за неимением других данных натуральных наблюдений). В связи со слабой гидрологической изученностью региона расчет средних и характерных расходов воды рек Ергенинской возвышенности проводился в соответствии с [СП 33-101-2003..., 2004; СНиП-2.01.14-1983, 1985; Атлас..., 1986] для малоизученных рек и при отсутствии материалов гидрометрических наблюдений. Оценка качества расчетов по методикам проверена по данным гидропоста Кетченеры в балке Амта-Бургуста (опорного створа для восточного и южного склонов Ергенинской возвышенности) и гидропоста х. Водянский на р. Аксай Есауловский (опорного створа для западного склона Ергенинской возвышенности).

В данной статье рассмотрен один из способов решения проблемы дефицита водных ресурсов в аридных районах с целью водообеспечения населения – искусственное пополнение запасов подземных вод (ИППВ) водами приемлемого качества за счет аккумуляции в подземных резервуарах весеннего талого стока.

ИППВ – комплекс инженерных мероприятий, направленных на увеличение питания подземных вод, а также на улучшение качества добываемой воды. Необходимые условия для создания систем ИППВ – наличие потребителей, водоносного горизонта, удовлетворяющего критериям емкостных и фильтрационных свойств; наличие возможного источника восполнения подземных вод определенного качества. В районе Ергенинской возвышенности существует значительная потребность в водных ресурсах, но отсутствуют источник восполнения и емкость для аккумуляции воды [Зекцер и др., 2012]. Тем не менее в работах [Искусственное..., 2005; Цуркан, 1993а; Цуркан 1993б] обосновывается возможность строительства подземных инфильтрационных бассейнов, создание которых зависит не только от фильтрационных свойств пород, но в большей степени от объема стока и режима водотоков Ергенинской возвышенности.

Согласно [Плотников, 1983], наиболее благоприятные для искусственного восполнения – водоносные горизонты аллювиальных отложений речных долин, реке – конусы выноса и водоносные горизонты дочетвертичных терригенных и карбонатных пород. Принято считать, что искусственное восполнение эффективно, если у водовмещающих отложений коэффициент фильтрации не менее 20 м/сут, мощность не менее 10 м, проводимость не менее 100 м<sup>2</sup>/сут [Зекцер и др., 2012]. В долинах рек инфильтрационные бассейны рекомендуется располагать либо на пойме, либо на первой надпойменной террасе.

Для оценки возможности проектирования и успешного функционирования инфильтрационных бассейнов в процессе исследования были проведены расчеты:

- коэффициентов инфильтрации водовмещающих водоносных горизонтов;
- гидрографа фильтрующихся вод;
- основных параметров и режима работы инфильтрационных бассейнов.

**Расчет величины инфильтрации из инфильтрационного бассейна.** Согласно [Bouwer, 1978], величина инфильтрации в слое  $i$  рассчитывалась как

$$V = K \frac{H + l - h}{l}, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость инфильтрации (расход) в  $i$ -м слое,  $K$  – коэффициент инфильтрации в промоченной

зоне,  $H$  – высота слоя воды над водоупором (глубина воды в инфильтрационном бассейне),  $l$  – глубина промоченного слоя. Величина капиллярного всасывания  $h$  (с учетом преобладания суглинков с прослоями песка в зоне аэрации) для Ергенинской возвышенности может быть выбрана равной 25 см [Bouwer et al., 1999]. Отметим, что  $K$  не совпадает с коэффициентом фильтрации ( $K_\phi$ ) в водонасыщенной зоне. Для песка  $K \approx 0,5K_\phi$ , для глин  $K \approx 0,25K_\phi$ .

При достаточно мощной водоненасыщенной зоне дробь в формуле (1) достигает 1 за время, много меньшее, чем продолжительность инфильтрации. В результате для практических целей можно принять  $V = K$ . Однако формула (1) может давать завышенные результаты при  $l < H$ , что характерно для балок долин, где  $l$  близко к 0. Также формула (1) дает завышенные результаты, если скорость инфильтрации значительно больше скорости движения в водоносном горизонте. В обоих случаях образуется гидрокупол (groundwater mounding). Если вершина купола достигает дна инфильтрационного бассейна, градиент напора становится менее 1. По этой причине для расчета  $V$  использовалась регрессионная зависимость, представленная в [Massmann et al., 2003]:

$$V = K \frac{H + l}{47,6K_\phi^{0,1}} C_F, \quad (2)$$

где  $H$ ,  $l$  и  $K$  аналогичны формуле (1),  $K_\phi$  – коэффициент фильтрации,  $C_F$  – коэффициент, учитывающий размеры инфильтрационного пруда:

$$C_F = 402,5F^{-0,76}, \quad (3)$$

где  $F$  – площадь инфильтрационного бассейна. При этом  $0,2 < C_F < 1$ . К нему вводились два поправочных коэффициента. Первый учитывал геометрию бассейна ( $C_{F1}$ ) [Massmann et al., 2003]:

$$C_{F1} = 0,98 + 0,02 \cdot L/B, \quad (4)$$

где  $L$  – длина бассейна, а  $B$  – его ширина (при этом  $C_{F1} < 1,4$ ); второй – заиливание, кольматацию и обрастание дна инфильтрационного бассейна ( $C_{F2}$ ). Последний с учетом физико-географических особенностей Калмыкии был принят равным 0,6. При этом его величина уменьшается со временем. В случае если условия эксплуатации инфильтрационных бассейнов не соблюдаются, величина инфильтрационного питания может уменьшиться на один-два порядка.

Информация о фильтрационных свойствах грунтов балок и оврагов Ергенинской возвышенности была получена из [Махота, Ершов, 2010], где приводятся сведения опытных откачек и моделирования

режима подземных вод Троицкого и Барятинского месторождений. Расчетные значения  $K_\phi$  для пород зоны аэрации, представленных аллювиально-делювиальными суглинками и глинами с прослоями песка, изменяются от 1,1 м/сут до 2,69 м/сут, при среднем значении 1,93 м/сут. Величина коэффициента  $K$  для русловых и пойменных отложений, представленных в основном средними суглинками, составляет 0,4–0,6 м/сут.  $K_\phi$  для аллювиально-делювиальных отложений (прослоев песка и супеси в глинах и суглинках) составляет порядка 0,4 м/сут.  $K_\phi$  ергенинского водоносного горизонта – 20 м/сут.

Поскольку искусственное восполнение подземных вод планировалось через выходы песков ергенинского водоносного горизонта,  $K_\phi$  был принят равным 12 м/сут [Махов, Ершов, 2010], а  $K = 0,5K_\phi$ . Коэффициент фильтрации ( $K_\phi$ ) илистого слоя после его осушения сравнительно высок и изменяется от 0,03 до 0,05 м/сут. Таким образом, можно предположить, что  $K_\phi$  инфильтрационного бассейна в результате его многолетней эксплуатации и формирования слоя илистых отложений в начале сезона восполнения (когда в нем еще сохранились трещины после осушки) может составить 0,05 м/сут. Определенную оценку величины  $K_\phi$  при условии отсутствия чистки дна инфильтрационного бассейна, а также при условии целостности слоя илистых отложений могут дать сведения о скорости фильтрации из пруда в долине р. Яшкуль, составляющие 0,002–0,004 м/сут.

**Расчет притока воды к инфильтрационному бассейну** (гидрографа) осуществлялся в два этапа. На первом этапе для выбранных створов определялся средний слой стока, его коэффициент вариации ( $C_v$ ) и асимметрии ( $C_s$ ). Принималось, что распределение годового стока подчиняется обобщенному распределению экстремальных величин GEV.

Использование GEV в качестве модели годового стока объясняется особенностями его формирования: практически весь годовой сток проходит пиками половодья, а в отдельные годы возможно его отсутствие. С помощью генератора случайных чисел было получено 1000 значений вероятности  $p$  от 0 до 1, на основании которых по заданной GEV был сгенерирован многолетний ряд слоя стока  $u$  за январь–май. Для модели внутригодового распределения стока были использованы данные наблюдений на посту б. Амта-Бургуста – с. Кетченеры. Ряд стока на р. Амта-Бургуста (1959–2018 гг.) был поделен на три категории в зависимости от величины эмпирической обеспеченности слоя стока за январь–май: маловодные ( $p > 66,6\%$ ), средние по водности ( $33,3 < p < 66,6\%$ ) и многоводные ( $p < 33,3\%$ ) годы. Дальнейший расчет происходил по схеме метода реального года [Рекомендации..., 1975].

**Расчет режима работы инфильтрационных бассейнов** проводился по приведенным выше формулам для разных сценариев обеспеченности поверхностного стока, исходя из следующих предположений:

– перед поступлением на инфильтрационные бассейны речная вода отстаивалась в водохранилищах-отстойниках, расположенных выше инфильтрационных бассейнов;

– на 1 ноября водохранилище считалось пустым;

– параметры для функции распределения вероятности объема годового стока брались согласно [Атлас..., 1986];

– внутрисезонное распределение стока бралось по данным б. Амта-Бургуста;

– в силу того что величина испарения в ноябре – мае с поверхности водосбора близка к величине потенциального испарения, дополнительные потери на испарение с водной поверхности считались равными 0;

– дополнительные потери на смачивание зоны аэрации при заполнении водохранилища зависели, среди прочего, от уровня грунтовых вод и степени промачивания почвы в долинах рек после прохождения половодья. Величина потерь считалась постоянной и равной 50 мм. Величина потерь относилась на начало периода питания (1 ноября);

– наполнение водохранилища происходило с ноября по февраль. В дальнейшем этой водой пополнялись подземные воды. Сток воды за март – май не задерживался в водохранилище и проходил транзитом. В течение марта вода в водохранилище отстаивалась. Непосредственно ИППВ осуществлялось с апреля по май;

– расчеты инфильтрации производились для 25 вариантов, учитывающих различные комбинации возможного объема водохранилища и коэффициента фильтрации;

– площадь покрытия водой дна инфильтрационного бассейна не зависела от уровня воды в нем;

– расстояние между дном инфильтрационного бассейна и уровнем воды в ергенинском водоносном горизонте на основе данных [Махота, Ершов, 2010] было принято равным 15 м;

– с 1 апреля по 30 мая в результате заиления и обрастания дна инфильтрационных бассейнов коэффициент фильтрации толщи грунтов, слагающих их дно, убывал от начального значения до 66,6% от него;

– первого июня независимо от степени наполненности водохранилища они полностью срабатывались;

– для расчета скорости фильтрации использовалась формула (2). Для инфильтрационных бассейнов в долине р. Яшкуль коэффициент  $C_{F2}$  составил 0,8. Для инфильтрационного бассейна в долине Хурын-Сала –  $C_{F2} = 1$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Главный источник питания рек и балок Калмыкии – осадки, выпадающие в холодную часть года. Роль дождевого питания невелика. На большинстве водотоков весь сток проходит весной в течение 30–50 дней, иногда этот временной интервал сокращается до 10 дней. На долю весеннего половодья приходится около 70–90% годового стока, таким образом, можно сказать, что в соответствии с классификацией М.И. Львовича, питание рек республики исключительно снеговое. В южной части Ергенинской возвышенности все водотоки представляют собой сухие балки, в которых наблюдается сток только в период весеннего снеготаяния и обильных дождей. Продолжительность весеннего половодья колеблется в довольно широких пределах в зависимости от размеров водосбора, интенсивности и продолжительности снеготаяния, которое может продолжаться от 1–3 дней на очень малых балках при дружной весне до двух и более недель на более крупных реках при затяжном снеготаянии. Большинство балок и рек непосредственно после весеннего половодья пересыхают и остаются без воды до следующего года. Круглогодичный сток наблюдается на реках, питание которых дополняется родниковыми водами: Аршань-Зельмень, Амта-Бургуста, Кара-Сал, Соленая, Яшкуль, Элистинка, Наин-Шара и др. На территории республики выявлено всего 110 родников, приуроченных, как правило, к среднему течению рек [Мимишев и др., 2018]. Питание за счет подземных вод незначительно, уменьшается с севера на юг и зависит от размеров водосбора, возрастая с увеличением последнего. Еще одной причиной круглогодичного стока может служить поступление сточных вод.

Проведенные расчеты неизученного стока основных рек и балок Ергенинской возвышенности позволили оценить величину поверхностных водных ресурсов региона и потенциал их дальнейшего использования. Впервые для этого региона получено столь полное представление о годовом и сезонном поверхностном стоке (табл. 1). Для водотоков в балках Яшкуль, Загиста и Хурын-Сала проведена оценка среднегодовых и сезонных расходов требуемой обеспеченности для участков месторождений подземных вод (Троицкое и Баяртинское), в пределах которых планируется создание системы ИППВ. На р. Яшкуль это пос. Верхний Яшкуль ( $F = 455 \text{ км}^2$ ). В устье б. Хурын-Сала в месте предполагаемой плотины  $F = 117 \text{ км}^2$ . Для створов планируемых плотин рассчитаны соответствующие объемы стока годового и максимального за половодье: для створа р. Яшкуль – с. Троицкое – 7,2; 5,65 млн  $\text{м}^3$  (при планируемом объеме водохранилища 3–3,5 млн  $\text{м}^3$ ), для устья б. Хурын-

Сала – 1,29; 1,04 млн м<sup>3</sup> (при планируемом объеме водохранилища – 1–1,5 млн м<sup>3</sup>) соответственно и проведены дополнительные расчеты годовых и сезонных расходов воды требуемой обеспеченности (табл. 2).

**Оценка климатических условий формирования половодья.** Средняя дата появления снежного покрова в РК варьирует от 21 ноября (на севере) до 21 декабря (о. Тюлений). Наиболее позднее установление снежного покрова (3 декабря) отмечается в центральной части республики (п. Яшкуль). Сход снежного покрова начинается в среднем с 22 февраля от побережья Каспия и заканчивается 23 марта на севере республики. Продолжительность залегания снежного покрова, таким образом, варьирует от 92 суток на севере до 23 суток на юге Калмыкии. Средняя максимальная высота снежного покрова в течение зимы незначительна, но также имеет четкую пространственную дифференциацию от 27,4 см в северных районах до 7,7 см на Каспийском побережье. При этом в течение зимы во время оттепелей снежный покров может полностью сходить на период от одного до нескольких дней.

В результате проведенного анализа метеорологических рядов были выявлены следующие современные климатические тенденции:

- в наименьшей степени изменения климата коснулись юго-восточной и западной частей Калмыкии;

- на всей территории Калмыкии отмечено сокращение продолжительности залегания снежного покрова, причем наименьшее – на побережье Каспия (от 1 дня/10 лет на о. Тюлений) и наибольшее на севере и северо-западе республики (до 9 дней/10 лет, мс Ремонтное);

- отмечен сдвиг даты схода снежного покрова в северных и центральных районах Калмыкии на более поздние сроки, в южных районах снег стал сходить чуть раньше;

- в северных и северо-западных районах выявлен незначительный рост числа периодов без снега в течение сезона;

- средняя и максимальная высота снежного покрова при этом практически не изменилась, таким образом, можно сделать вывод об отсутствии значимых изменений в величине запаса воды в снежном покрове – главном источнике весеннего питания рек и формирования основной доли их годового стока.

Максимальный запас воды в снежном покрове, по данным [GlobSnow, 2022], на рассматриваемой территории наблюдается в феврале и имеет широтную закономерность распространения: от >7 мм на южной оконечности Ергеней, до ~20 мм на северной. В марте в южной и центральной части Калмыкии снег зачастую отсутствует, в результате чего среднемесячные величины запасов воды в снежном покрове составляют первые миллиметры (<5 мм).

Поскольку в ряде случаев половодье на реках Ергенинской возвышенности начинается уже в январе, многолетняя динамика влажности почвы анализировалась по данным за декабрь в верхнем метровом слое [ERA5-Land, 2022]. Было установлено, что в 1981–2019 гг. влажность почвы в декабре практически на всей территории Калмыкии снижалась, причем наиболее интенсивно (>3,8%/10 лет) в северных, более увлажненных районах Ергеней (рис. 2). Вероятно, это связано с тем, что в южных районах в декабре регулярно бывают оттепели, во время которых влажность почвы растет за счет таяния снежного покрова и выпадения жидких осадков. С ростом температуры воздуха оттепели стали случаться чаще.

До 2005 г. влажность почвы составляла в среднем 0,253. Однако с 2006 г. наметилась тенденция ее уменьшения, и за 2006–2019 гг. ее средняя величина опустилась до 0,225, с минимумом в декабре 2012 г. – 0,176. Уменьшение влажности почвы влечет за собой рост потерь весеннего стока на фильтрацию в грунты.

**Оценка изменения годового и сезонного стока.**

Статистически значимое сокращение годового стока и наиболее заметное его внутрисезонное перераспределение в южных районах России (в частности в бассейне Дона) отмечено в [Kireeva et al., 2016, 2019; Джамалов и др., 2017; Blöschl et al., 2019; Варенцова и др., 2021] и подтверждается нашим анализом. Так, в бассейне р. Есауловский Аксай сокращение годового стока за последние 40 лет достигает 32% и является статистически значимым. С 2003 по 2020 гг. в бассейне Аксая, как на многих других реках бассейна Дона, наблюдалось затяжное маловодье (рис. 3). При общем сокращении годового стока отмечено выравнивание его внутригодового распределения за счет сокращения половодья и выравнивания межлетних расходов (уменьшения амплитуды их колебаний).

Оценка особенностей формирования стока на водосборах аридных зон в современных условиях изменения климата была проведена на основе опубликованных ранее результатов научных исследований [Барабанов и др., 2018; Коронкевич и др., 2018; Долгов и др., 2020], в которых формирование стока с гидрографической сети в пределах бровок речной долины и склонового стока водораздельных поверхностей рассматривалось отдельно. По результатам этих исследований на севере Ергенинской возвышенности после 1980 г. было отмечено заметное сокращение склонового стока с зяби на 83% (с 6 до 1 мм), а с уплотненной пашни на 70% (с 23 до 7 мм). В результате подобных изменений, согласно [Коронкевич и др., 2018], в степной зоне после 2000 г. произошло изменение источников питания половодья.

Таблица 1

Среднемноголетние годовые и сезонные характеристики стока водотоков Ергенинской возвышенности

Названия рек и балок	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Модуль стока, л/с×км <sup>2</sup>	Среднегодовой расход воды, м <sup>3</sup> /с				Максимальный расход воды половодья, м <sup>3</sup> /с			Минимальный 30-суточный расход Q <sub>30</sub> , м <sup>3</sup> /с		
			Q <sub>0</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>50</sub>	Q <sub>95</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>50</sub>	Q <sub>95</sub>	Лето	Зима	Год
			<i>Восточный склон Ергенинской возвышенности – бассейн бессточных Сарпинских озер</i>									
Р. Мал. Тингула	35	1,00	0,04	0,090	0,028	0,004	21,9	1,88	0,005	0,004	0,003	0,003
Б. Средн. Ласта	106	0,90	0,10	0,245	0,076	0,011	45,0	4,28	0,015	0,012	0,010	0,009
Б. Дальняя Ласта	115	0,85	0,10	0,257	0,077	0,011	45,9	4,43	0,021	0,013	0,010	0,009
Р. Грязная	108	0,80	0,09	0,231	0,067	0,009	42,7	4,06	0,015	0,012	0,010	0,009
Р. Ялмага	335	0,75	0,25	0,71	0,185	0,019	77,7	10,9	0,160	0,037	0,030	0,027
Р. Зельмень	563	0,70	0,39	1,096	0,295	0,032	101	14,2	0,209	0,062	0,051	0,046
Б. Большая Зуха	63	0,60	0,04	0,113	0,026	0,002	25,9	2,23	0,006	0,007	0,006	0,005
Б. Серпин Сала	73	0,50	0,04	0,11	0,025	0,002	26,0	2,30	0,009	0,008	0,007	0,006
Р. Аршань-Зельмень	434	0,48	0,21	0,625	0,144	0,011	65,1	9,13	0,134	0,048	0,039	0,035
Р. Каменная	258	0,45	0,12	0,348	0,08	0,006	50,1	7,03	0,103	0,029	0,023	0,021
Б. Сухая	48	0,45	0,02	0,065	0,015	0,001	18,6	1,56	0,004	0,005	0,004	0,004
Б. Элиста	249	0,35	0,09	0,261	0,06	0,004	34,9	4,90	0,072	0,028	0,023	0,02
Б. Широкая	35	0,35	0,01	0,037	0,008	0,001	14	1,18	0,003	0,004	0,003	0,003
Р. Амга-Бургуста	181	0,40	0,07	0,217	0,05	0,004	40,3	4,71	0,044	0,020	0,016	0,015
Б. Гашун-Бургуста	224	0,38	0,09	0,255	0,059	0,004	41,1	5,77	0,085	0,025	0,020	0,018
Б. Бухога (Сухога)	544	0,35	0,19	0,571	0,132	0,010	59,9	8,41	0,123	0,060	0,050	0,044
Б. Кегульга	236	0,35	0,08	0,248	0,057	0,004	39	5,48	0,080	0,026	0,021	0,019
Б. Овата	255	0,35	0,09	0,268	0,062	0,005	40,3	5,66	0,083	0,028	0,023	0,021
Б. Ар-Нур	184	0,35	0,06	0,193	0,045	0,003	34,4	4,09	0,038	0,020	0,017	0,015
Б. Дунд-Нур	224	0,35	0,08	0,235	0,054	0,004	36,6	5,14	0,075	0,025	0,020	0,018
Б. Эмнэ-Нур	204	0,35	0,07	0,214	0,049	0,004	33,7	4,74	0,069	0,023	0,019	0,017
Б. Ялмага	360	0,35	0,13	0,378	0,087	0,006	44,3	6,21	0,091	0,040	0,033	0,029
Б. Курин-Эккин	186	0,35	0,07	0,195	0,045	0,003	30,2	4,24	0,062	0,021	0,017	0,015
Р. Яшкуль	1860	0,35	0,65	1,953	0,451	0,033	89,9	12,6	0,185	0,206	0,169	0,151
Б. Улан-Зуха	773	0,35	0,28	0,84	0,194	0,014	54,9	7,71	0,113	0,086	0,070	0,063
Б. Мукта	454	0,35	0,16	0,477	0,11	0,008	41,8	5,87	0,086	0,050	0,041	0,037

Окончание таблицы 1

Названия рек и балок	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Модуль стока, л/с×км <sup>2</sup>	Среднегодовой расход воды, м <sup>3</sup> /с				Максимальный расход воды половодья, м <sup>3</sup> /с				Минимальный 30-суточный расход $Q_{50}$ , м <sup>3</sup> /с		
			$Q_0$	$Q_5$	$Q_{50}$	$Q_{95}$	$Q_5$	$Q_{50}$	$Q_{95}$	Лето	Зима	Год	
Б. Семен	606	0,21	0,13	0,382	0,088	0,006	46,4	6,51	0,095	0,067	0,055	0,049	
Б. Семен	295	0,21	0,06	0,186	0,043	0,003	33,8	4,75	0,070	0,033	0,027	0,024	
Б. Шугта	92	0,20	0,02	0,055	0,013	0,001	17,5	1,61	0,006	0,010	0,008	0,007	
Б. Шаред	324	0,21	0,07	0,198	0,049	0,004	31,5	5,15	0,128	0,036	0,029	0,026	
<b>Западный склон Ергенинской возвышенности – бассейн р. Дон</b>													
Р. Есауловский Аксай	2110	1,0	2,11	6,144	1,509	0,133	239	33,5	0,492	0,215	0,249	0,200	
Р. Курмоярский Аксай	316	0,85	0,27	0,776	0,194	0,018	96,3	13,5	0,198	0,032	0,037	0,030	
Р. Курмоярский Аксай	1180						165	23,2	0,340	0,120	0,139	0,112	
Р. Кара-Сал	1214	0,45	0,55	1,639	0,379	0,028	116	16,2	0,238	0,124	0,143	0,115	
Б. Загиста	926	0,38	0,35	1,056	0,244	0,018	91,5	12,8	0,188	0,094	0,060	0,056	
Р. Джурак-Сал	96	0,40	0,04	0,115	0,027	0,002	32,8	3,07	0,011	0,010	0,011	0,009	
<b>Южный склон возвышенности – бассейн оз. Мангыч-Гудило</b>													
Б. Улан-Зуха	1388	0,30	0,42	1,249	0,289	0,021	373	52,4	0,77	0,154	0,126	0,112	
Б. Хар-Зуха	925	0,35	0,32	0,971	0,224	0,017	354	49,7	0,73	0,103	0,084	0,075	
Б. Наин-Шара	781	0,35	0,27	0,82	0,189	0,014	350	49,2	0,72	0,087	0,071	0,063	
Б. Хагин-Сала	433	0,45	0,19	0,398	0,176	0,058	285	56,8	2,55	0,044	0,051	0,041	
Б. Джалга	614	0,40	0,25	0,538	0,216	0,059	294	62,3	3,30	0,063	0,072	0,058	

Примечание. Здесь и далее расходы воды:  $Q_0$  – среднегодовой;  $Q_5$  – 5%-й,  $Q_{50}$  – 50%-й и  $Q_{95}$  – 95%-й обеспеченности.

Таблица 2

### Среднегоголетние расходы воды балок Яшкуль и Хурын-Сала в створах планируемых инфильтрационных бассейнов

Названия рек и балок	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Модуль стока, л/с×км <sup>2</sup>	Среднегодовой расход воды, м <sup>3</sup> /с				Максимальный расход половодья, м <sup>3</sup> /с				Минимальный 30-суточный расход $Q_{50}$ , м <sup>3</sup> /с		
			$Q_0$	$Q_5$	$Q_{50}$	$Q_{95}$	$Q_5$	$Q_{50}$	$Q_{95}$	Лето	Зима	Год	
Р. Яшкуль, верх. Яшкуль	455	0,35	0,16	0,478	0,11	0,008	35,8	39,0	1,47	0,050	0,037	0,039	
Б. Хурын-Сала	117						0,123	0,028	0,002	0,013	0,009	0,010	

Доля склонового стока в половодье в степной зоне уменьшилась с 50 до 13%, а с гидрографической сети выросла с 42 до 70%. Величина подземного стока и стока верховодки выросла с 8 до 17%. Сокращение склонового стока объясняется уменьшением глубины промерзания, влажности почвы и запасов воды в снеге. Сток в гидрографическую сеть со склонов речной долины менее подвержен климатическим изменениям. Высокий коэффициент стока, несмотря на малую глубину промерзания, сохраняется благодаря относительно большой крутизне склонов. Также в результате метелевого переноса в понижениях рельефа скапливается

больше снега, чем на плакоре: максимальные снегозапасы в овражно-балочной сети превышают их аналогичную величину на склонах лесостепной зоны в три раза. Однако, в связи с сокращением доли твердых и смешанных осадков с середины 1970-х гг. [Коронкевич, 1990], интенсивность метелевого переноса зимних осадков ослабла. Таким образом, вероятно, что более 70% стока половодья в пределах Ергенинской возвышенности формируется в пределах гидрографической сети, и с середины 1970-х гг. существует тенденция к дальнейшему увеличению этой доли за счет уменьшения склонового стока.

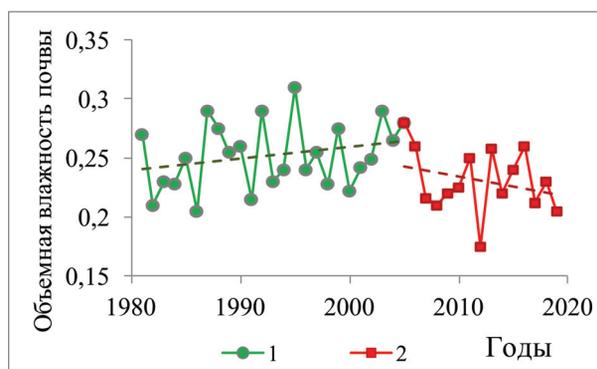


Рис. 2. Объемная влажность почвы в декабре в Троицком районе Калмыкии: 1 – 1981–2005 гг.; 2 – 2006–2019 гг.

Fig. 2. Volumetric soil moisture in December in the Troitsky region of Kalmykia: 1 – 1981–2005; 2 – 2006–2019

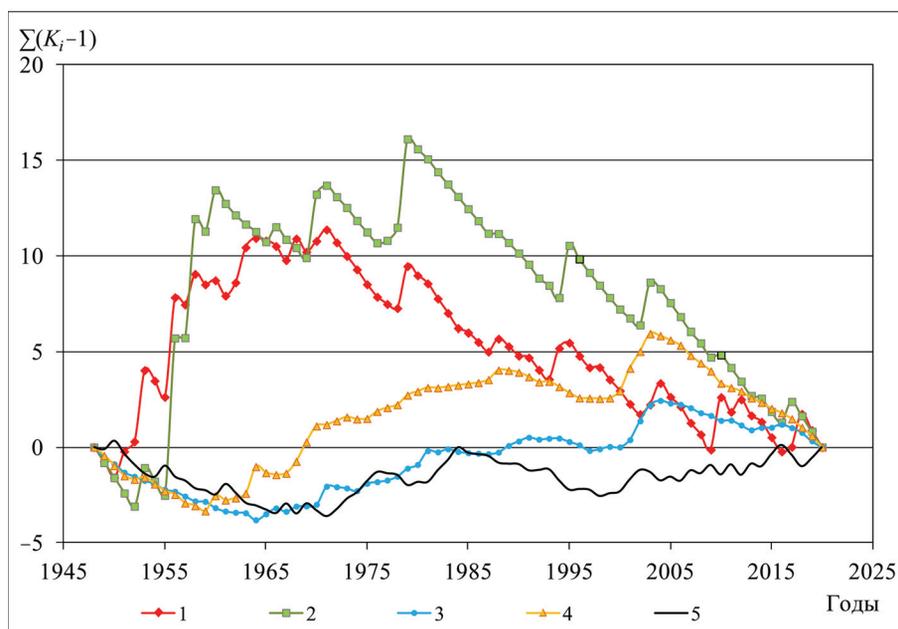


Рис. 3. Разностные интегральные кривые стока р. Аксай Есауловский – х. Водянский: 1 – годового; 2 – среднего меженного; минимального месячного (3 – зимнего и 4 – летнего); 5 – коэффициента естественной зарегулированности

Fig. 3. Difference integral curves of river flow for Aksai Esaulovskiy – farm Vodyansky: 1 – annual; 2 – average low water; minimum monthly (3 – winter and 4 – summer); 5 – coefficient of natural water regulation

Таким образом, в целом можно утверждать, что при современных условиях изменения климата и существующих устойчивых тенденциях изменения основных факторов формирования стока и, как следствие, гидрологического режима водотоков Калмыкии ситуация с доступностью пресной воды в будущем лишь ухудшится и необходимо искать способы устранения дефицита водных ресурсов и решения вопроса устойчивого водоснабжения населения. Одним из возможных направлений является наращивание объемов водопользования за счет подземных вод. Однако их ресурсы необходимо поддерживать во избежание истощения при чрезмерном отборе, да и качество этих вод в настоящее время не соответствует питьевым стандартам. В связи с этим для условий Калмыкии задачу водоснабжения населения было предложено решить путем искусственного пополнения подземных вод (ИППВ) водами талого весеннего стока. Основные ресурсы пресных подземных вод в пределах Калмыкии формируются в пределах Ергенинской возвышенности. На ее восточном склоне речная сеть представлена левыми притоками Сала, а на правом – более чем 20 малыми реками и балками. Некоторый опыт эксплуатации ИППВ в Калмыкии уже имеется. Согласно [Цуркан, 1993а], строительство земляной дамбы весной 1989 г. позволило увеличить питание подземных вод на участке Троицкого МПВ с 60 тыс. м<sup>3</sup> до порядка 95 тыс. м<sup>3</sup> за сезон. В дальнейшем дамба была смыта и в 1990 г. уже не функционировала.

**Расчет параметров и режима работы инфильтрационных бассейнов.** По данным о планируемых инфильтрационных бассейнах, выходах ергенинских песков на поверхность и результатам расчетов стока проведена оценка потенциальных размеров инфильтрационных бассейнов и объем возможного притока вод к ним (табл. 3).

В базовом сценарии (см. табл. 3) величина питания из инфильтрационных бассейнов, расположенных в долине р. Яшкуль, составит 923 тыс. м<sup>3</sup>/год, а из бассейнов, расположенных в долине б. Хурын-Сала, – 134 тыс. м<sup>3</sup>/год, т. е. суммарно инфильтрационные бассейны будут восполнять порядка 16,9% объемов откачки подземных вод (15 тыс. м<sup>3</sup>/сут) на второй очереди Троицкого водозабора. Средне-голетняя величина питания зависит как от размеров водохранилищ, так и от коэффициентов фильтрации. При объемах водохранилищ в 1263 тыс. м<sup>3</sup> в долине Яшкуля и 183 тыс. м<sup>3</sup> в долине Хурын-Сала величина ИППВ достигает максимума, т. к. эти величины представляют собой максимально возможную величину питания из инфильтрационных бассейнов. При большем объеме задержания поверхностных вод в водохранилищах к началу мая не вся вода из них успеет профильтроваться в инфильтрационных бассейнах. При меньшем объеме задержания объем водохранилищ определяет средне-голетнюю величину питания практически по линейной зависимости – она составляет от 65 до 88% от объема водохранилища.

Таблица 3

### Среднегодовая величина притока воды к инфильтрационным бассейнам и их морфометрические параметры для ряда водотоков Калмыкии

Водоток	Инфильтрационный бассейн	Площадь, м <sup>2</sup>	Коэффициент фильтрации по базовому сценарию $K_{\phi}$	Глубина залегания воды, м	Объем водохранилища по базовому сценарию, млн м <sup>3</sup>
Яшкуль	1	10 000	12	15	2,5
	2	10 000	12	15	
	3	750	12	15	
Хурын-Сала	4	2400	12	15	1,0

В процессе работы инфильтрационных бассейнов величина инфильтрации из них снижается. Скорость снижения  $K_{\phi}$  зависит от проведения мероприятий по чистке дна инфильтрационных отложений, удаления донных отложений и верхнего слоя почвогрунтов, подвергшегося кольматации. От величины  $K_{\phi}$  зависит максимально возможная величина инфильтрации, в результате по мере его снижения величина инфильтрации все меньше зависит от объема притока воды к водохранилищу и от объема самого

водохранилища. Так, при снижении  $K_{\phi}$  в 10 раз суммарный объем инфильтрационного питания уменьшается с 923 до 159 тыс. м<sup>3</sup>/год. Обобщающий график зависимости величины средне-голетнего инфильтрационного питания от объема водохранилища для рек Яшкуль и Хурын-Сала представлен на рис. 4.

Наибольшее влияние на величину инфильтрационного питания водность года оказывает при базовых значениях объема водохранилища и коэффициента фильтрации. Так, величина питания в год 10%-й

обеспеченности речного стока превышает аналогичную величину в год 80%-й обеспеченности в долине р. Яшкуль в 5,4 раза, а в долине р. Хурын-Сала в 3,1 раза. При  $K_{\phi}$  менее 1,2 м/сут величина питания из инфильтрационных бассейнов практически не зависит от объема водохранилища, а величины питания 80%-й и 10%-й обеспеченности не отличаются друг от друга, т. к. основным фактором, лимитирующим величину ИППВ, становится скорость инфильтрации, а не количество доступной воды.

По результатам расчетов среднееголетняя величина инфильтрационного питания при 80%-й обеспеченности объема притока составит от 2,8 тыс. м<sup>3</sup>/год

(январь–май) в б. Амта-Бургуста до 18,2 тыс. м<sup>3</sup>/год в б. Улан-Зуха. В качестве сценария изменения  $K_{\phi}$  принималось, что при отсутствии очистки дна инфильтрационных бассейнов в среднем величина инфильтрационного питания будет уменьшаться на 14% в год, и через 20 лет эксплуатации их роль в питании подземных вод сведется к минимуму. При этом для маловодных лет (90%-й обеспеченности стока) пополнение подземных вод минимально, начиная с первого года их эксплуатации. Заметно большие объемы инфильтрующихся вод будут в первые 10 лет эксплуатации бассейнов с наибольшим их заполнением (годы 50%-й и 10%-й обеспеченности стока).

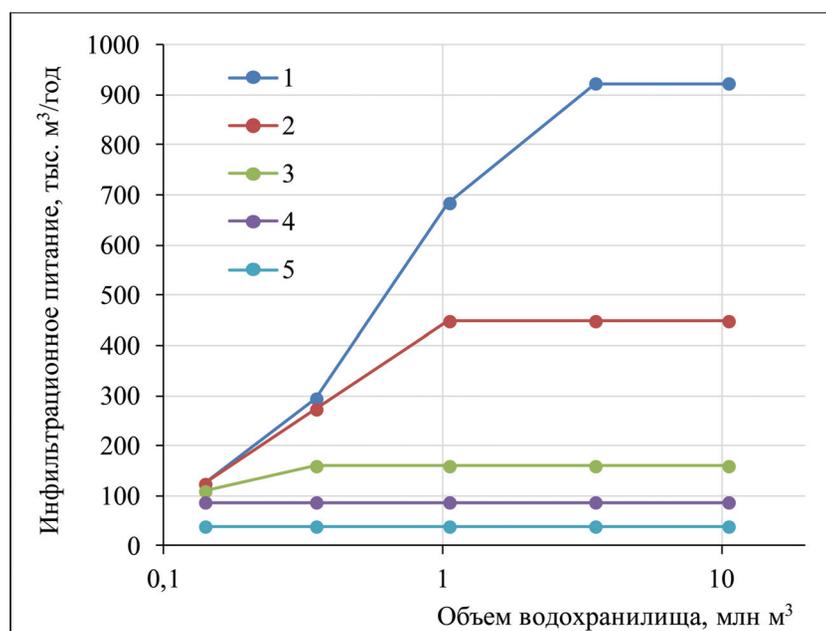


Рис. 4. Зависимость среднегогодовой величины инфильтрационного питания в долинах рек Яшкуль и Хурын-Сала от объема водохранилищ в них при коэффициентах фильтрации в инфильтрационных бассейнах:  
1 – 12 м/с; 2 – 4,2 м/с; 3 – 1,2 м/с; 4 – 0,6 м/с; 5 – 0,24 м/с

Fig. 4. Dependence of the long-term average value of infiltration nutrition in the Yashkul and Khuryn-Sala river valleys on the volume of reservoirs in them under the following filtration coefficients in infiltration basins:  
1 – 12 m/s; 2 – 4,2 m/s; 3 – 1,2 m/s; 4 – 0,6 m/s; 5 – 0,24 m/s

Объемы инфильтрационного питания в первые 10 лет эксплуатации бассейнов подвержены заметным ежегодным колебаниям, которые зависят от гидрографа притока воды к инфильтрационному бассейну за сезон. В годы 90%-й обеспеченности инфильтрационное питание из бассейнов практически отсутствует, составляя от 0,033 тыс. до 0,92 тыс. м<sup>3</sup>, что в 20–80 раз меньше среднегогодовой величины. В год 80%-й обеспеченности величина питания в 2–2,5 раза меньше среднегогодовой, а в год 10%-й обеспеченности превышает ее в 1,5–1,6 раза.

Отметим, что ежегодная очистка инфильтрационного бассейна позволяет избежать сниже-

ния  $K_{\phi}$ , увеличить среднегогодовое питание в 2,8–2,9 раза по сравнению с эксплуатацией бассейнов без очистки и в 1,7–1,8 раза в случае проведения очистки раз в 10 лет. Среднегогодовая величина инфильтрационного питания в бассейнах выбранных рек практически полностью зависит от морфометрических параметров инфильтрационных бассейнов и коэффициента влагопереноса пород зоны аэрации. Это связано с тем, что среднегогодовая величина притока воды к инфильтрационным бассейнам превышает величину инфильтрации из них в среднем в 1000 раз (от 720 для б. Улан-Зуха до 1510 для р. Яшкуль).

## ВЫВОДЫ

Потепление климата в регионе происходило в две волны: в 1910–1945 гг. и после 1976 г. (наиболее интенсивное). Рост температуры воздуха в РК (как и на всем юго-востоке ЕТР) начался с конца 1980-х гг. Отмечен сдвиг сроков схода снежного покрова на более ранние сроки и сокращение общего периода залегания снежного покрова, особенно в северных и северо-восточных районах республики.

Вследствие климатических изменений наметились тенденции сокращения годового стока рек РК и его внутригодового перераспределения путем сокращения весеннего, роста зимнего и выравнивания колебания межлетнего летнего стока. Во многих балках РК отмечается исключительно сезонный (весенний) сток с полным пересыханием русел в теплую часть года. Основными источниками поверхностных водных ресурсов в РК являются малые реки и временные водотоки Ергенинской возвышенности. При слабой изученности гидрологического режима рек РК была проведена количественная оценка современных водных ресурсов. Среднегодовой сток рек с восточного склона Ергенинской возвышенности оценен в 0,120 км<sup>3</sup>/год, западного склона – в 0,105 и южного – в 0,045 км<sup>3</sup>/год. Проведены оценки стока в годы разной обеспеченности.

При естественном дефиците водных ресурсов в РК в условиях аридного климата также заметно ухудшается их качество, усугубленное антропогенным загрязнением вод, что в настоящее время критическим образом сказывается на водоснабжении населения. Использование подземных вод для покрытия дефицита водоснабжения привело к истощению их запасов и образованию депрессионных воронок в местах водозаборов. Для восполнения запасов подземных вод и улучшения их качества рассмотрен альтернативный вариант пополнения подземных вод за счет инфильтрации поверхност-

ного стока, аккумулируемого в инфильтрационных бассейнах (ИППВ).

Величина притока воды к инфильтрационному бассейну в большинстве лет мало лимитирует величину инфильтрационного питания подземных вод из него, т. к. она практически полностью зависит от морфометрических параметров инфильтрационного бассейна и коэффициента влагопереноса пород зоны аэрации. Так среднегодовой приток воды к инфильтрационным бассейнам превышает величину инфильтрации из них в среднем в 6,8 раза. Кроме того, в случае отсутствия ежегодных мероприятий по очистке инфильтрационных бассейнов и уменьшения коэффициента фильтрации, питание подземных вод будет сокращаться и достигнет порядка 38 тыс. м<sup>3</sup>/год.

Суммарный расход Троицкого и Баярнинского МПВ (22 тыс. м<sup>3</sup>/сут) в 8,7 раза выше, чем максимально возможный объем суммарной инфильтрации из четырех предполагаемых инфильтрационных бассейнов (около 923 тыс. м<sup>3</sup>/год). Кроме того, неустойчивость поверхностного стока, а в перспективе – снижение весеннего стока при снижении количества зимних осадков может сделать строительство и поддержание в рабочем состоянии ИППВ экономически невыгодным, а в условиях вероятного отсутствия у водоемов ИППВ зон санитарной охраны, обустроенных в соответствии с действующими требованиями, опасными с точки зрения ухудшения качества существующих подземных вод. Также вызывает вопросы возможность размыва стенок водохранилищ-отстойников при половодьях или паводках высокой обеспеченности.

Таким образом, ИППВ можно рассматривать в качестве временной меры, позволяющей немного уменьшить интенсивность снижения УГВ до реставрации существующих либо до строительства новых гидротехнических сооружений, в частности водоводов, поставляющих волжскую воду в Элисту.

**Благодарность.** Работа проводилась в рамках темы госзадания кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова ч. 2 I.10 «Анализ, моделирование и прогнозирование изменений гидрологических систем, водных ресурсов и качества вод суши», оценка возможности и целесообразности создания инфильтрационных бассейнов для пополнения запасов подземных вод – за счет гранта РНФ № 21-47-00008. Климатический анализ проведен в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды» (программа «Климат и окружающая среда»). Часть данных собрана и обработана в рамках темы № FMWZ-2022-0001 Государственного задания ИВП РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). Министерство природных ресурсов и экологи-

гии Российской Федерации Федеральное агентство водных ресурсов. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения 15.11.2022).

- Атлас расчетных гидрологических карт и номограмм. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 23 л.
- Барабанов А.Т., Долгов С.В., Коронкевич Н.И. Влияние современных изменений климата и сельскохозяйственной деятельности на весенний поверхностный склоновый сток в лесостепных и степных районах Русской равнины // *Водные ресурсы*. 2018. Т. 45. № 4. С. 332–340.
- Бембеев А.В., Щитицын М.Н. Оценка эксплуатационных запасов пресных и солоноватых подземных вод на территории Республики Калмыкия // *Южно-российский вестник геологии, географии и глобальной энергии*. 2005. № 1(10). С. 71–86.
- Варенцова Н.А., Киреева М.Б., Харламов М.А., Варенцов М.И., Фролова Н.Л., Повалишник Е.С. Формирование весеннего стока рек ЕТР: основные факторы и способы их учета. I. Обзор исследований // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2022. Т. 384. № 2. С. 92–116. DOI: 10.37162/2618-9631-2022-2-92-116.
- Варенцова Н.А., Гречушников М.Г., Повалишник Е.С., Киреева М.Б., Харламов М.А., Фролова Н.Л. Влияние климатических и антропогенных факторов на весенний сток в бассейне Дона // *Вестн. Моск. унта. Сер. 5. Геогр.* 2021. № 5. С. 91–108.
- Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: Государственный гидрологический институт, 2008. 600 с.
- Габунцин С.В. Экологическая безопасность России на региональном уровне (на материалах Республики Калмыкия). Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ, 2009. 192 с.
- Гидрохимический сток рек европейской части России. Атлас / под ред. Р.Г. Джамалова, О.С. Решетняк, М.М. Трофимчука. М.: ИВП РАН, 2020. 155 с.
- Джамалов Р.Г., Киреева М.Б., Косолапов А.Е., Фролова Н.Л. Водные ресурсы бассейна Дона и их экологическое состояние. М.: ГЕОС, 2017. 204 с.
- Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А. Ландшафтно-гидрологические изменения в бассейне Дона // *Водные ресурсы*. 2020. Т. 47. № 6. С. 674–685. DOI: 10.31857/S032105962006005X
- Зекцер И.С., Потапова Е.Ю., Четверикова А.В., Штенгелов Р.С. Перспективы искусственного восполнения подземных вод юга европейской части России // *Водные ресурсы*. 2012. Т. 39. № 6. С. 624–638.
- Искусственное пополнение запасов грунтовых вод при решении проблемы водоснабжения в Калмыкии // *Недра Поволжья и Прикаспия*. Саратов, 2005. Вып. 41. С. 29–34.
- Коронкевич Н.И. Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения. М.: Наука, 1990. 205 с.
- Коронкевич Н.И., Георгиади А.Г., Долгов С.В., Барабанова Е.А., Какутина Е.А., Милукова И.П. Изменение стока снегового половодья на южном макросклоне Русской равнины в период 1930–2014 гг. // *Лед и снег*. 2018. Т. 58. № 4. С. 498–506.
- Махота Т.А., Ершов Г.Е. Переоценка эксплуатационных запасов пресных подземных вод Троицкого и Баяртинского месторождений для муниципальных нужд г. Элисты Республики Калмыкия: в 6 кн. и 1 папке. Книга 1: Геологический отчет. 2010. 192 с.
- Мимишев А.А., Очирова А.Н., Кириладзе В.А., Шарая Б.М., Джальчинова Т.Б. Анализ основных источников питьевого водоснабжения на территории Республики Калмыкия // *Геология, география и глобальная энергия*. 2018. № 2(69). С. 26–39.
- Плотников Н.А. Проектирование систем искусственного восполнения подземных вод для водоснабжения. М.: Стройиздат, 1983. 230 с.
- Полонский А.Б., Башарин Д.В. Влияние климатического сдвига 1976–1977 гг. на крупномасштабную структуру приземных метеорологических полей Евразии // *Метеорология и гидрология*. 2008. № 5. С. 16–30.
- Рекомендации по расчетам внутригодового распределения стока при строительном проектировании. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 72 с.
- СНиП 2.01.14-83. Определение расчетных гидрологических характеристик. Государственный комитет СССР по делам строительства. М.: Стройиздат, 1985. 36 с.
- СП-33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М.: Госстрой России, 2004. 72 с.
- Хочаева С.С., Васильева П.Д. О проблемах использования водных объектов Калмыкии, являющихся источниками водоснабжения // *Наука и бизнес: пути развития*. 2017. № 12. С. 68–73.
- Цуркан С.Я. Оценка условий формирования и возможности искусственного пополнения ресурсов подземных вод Калмыкии для их рационального использования: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М.: ВСЕГИНГЕО, 1993а. 240 с.
- Цуркан С.Я. Условия формирования ресурсов пресных подземных вод Калмыкии // *Геоинформмаркт*, 1993б. Вып. 8. С. 29–34.
- Blöschl G., Hall J., Viglione A. Changing climate both increases and decreases European river floods, *Nature*, 2019, vol. 573, p. 108–111, DOI: 10.1038/s41586-019-1495-6.
- Bouwer H. *Groundwater hydrology*, McGraw-Hill, New York, 1978, 480 p.
- Bouwer H., Back J.T., Oliver J.M. Predicting infiltration and ground water mounting for artificial recharge, *Journal Hydrol. Eng., Am. Soc. Civil. Eng.*, 1999, vol. 4(4), p. 350–357.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 Global Reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, DOI: 10.1002/qj.3803.
- Kireeva M.B., Frolova N.L., Dzhamaalov R.G., Rets E.P., Povlishnikova E.S., Pakhomova O.V. Low flow on the rivers of the European part of Russia and its hazards, *Geography, Environment, Sustainability*, 2016, vol. 9, no. 4, p. 33–47, DOI: 10.15356/2071-9388\_04v09\_2016\_03.
- Kireeva M.B., Frolova N.L., Rets E.P. et al. Evaluating climate and water regime transformation in the European part of Russia using observation and reanalysis data for the 1945–2015 period, *International Journal of River Basin Management*, 2019, vol. 18, no. 4, p. 491–502, DOI: 10.1080/15715124.2019.1695258.
- Massmann J.W., Butchart C., Stolar S. Infiltration Characteristics, Performance, and Design of Stormwater Facilities, Final Research Report, Research Project T1803, Task 12, Washington State Department of Transportation, Olympia, Washington, 2003.
- Электронные ресурсы*  
О региональной комплексной программе «Чистая вода» на 2009–2022 годы. Электронный фонд

- Консорциум «Кодекс». URL: <https://docs.cntd.ru/document/460201863> (дата обращения 20.04.2023).
- Ранькова Э.Я., Груза Г.В., Рочева Э.В., Самохина О.Ф. Температура приземного воздуха // Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М., 2014. С. 37–72. URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2016/od2/od2.pdf> (дата обращения 04.04.2023).
- Справка о современном состоянии подземных вод и опасных экзогенных геологических процессов на территории Республики Калмыкия в 2022 г. URL: <http://geomonitoring.ru/download/spravki/yfo/%D0%A1%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BA%D0%B0%20%D0%A0%D0%B5%D1%81%D0%BF%D1%83%D0%B1%D0%BB%D0%B8%D0%BA%D0%B0%20%D0%9A%D0%B0%D0%BB%D0%BC%D1%8B%D0%BA%D0%B8%D1%8F.pdf?ysclid=lm9j3ogumm441606806> (дата обращения 20.04.2023).
- Строительство водопровода от Волги до Калмыкии // Правительство Республики Калмыкия. 2022. URL: <http://kalmregion.ru/novosti/stroitelstvo-vodoprovoda-ot-volgi-do-kalmykii/> (дата обращения 15.06.2022).
- Схема комплексного использования и охраны водных объектов бессточных районов междуречья Терека, Дона и Волги. Книга 2: Оценка экологического состояния и ключевые проблемы бессточных районов. Западнo-Каспийское БВУ, 2014. 29 с. URL: <http://zkbvu.ru/upload/medialibrary/3f3/3f36ebd80fb8bf333e01ac51fb2aec5.pdf> (дата обращения 10.04.2023).
- ERA5-Land, *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), URL: <https://www.ecmwf.int/en/era5-land> (дата обращения 14.02.2022).
- GlobSnow, *GlobSnow v.3.0*, Finnish Meteorological Institute, ESA, URL: <https://www.globsnow.info/> (дата обращения 14.02.2022).
- IPCC, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013, Hartmann D., Klein Tank A., Rusticucci M. et al., chapter 2, Observations: Atmosphere and Surface, p. 159–254, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, URL: [https://www.researchgate.net/publication/262677624\\_IPCC\\_2013\\_Climate\\_Change\\_2013\\_in\\_The\\_Physical\\_Science\\_Basis\\_Working\\_Group\\_I\\_Contribution\\_to\\_the\\_Fifth\\_Assessment\\_Report\\_of\\_the\\_Intergovernmental\\_Panel\\_on\\_Climate\\_Change\\_WMOUNEP\\_Cambridge](https://www.researchgate.net/publication/262677624_IPCC_2013_Climate_Change_2013_in_The_Physical_Science_Basis_Working_Group_I_Contribution_to_the_Fifth_Assessment_Report_of_the_Intergovernmental_Panel_on_Climate_Change_WMOUNEP_Cambridge) (дата обращения 15.04.2023).

Поступила в редакцию 05.08.2023

После доработки 25.09.2023

Принята к публикации 06.10.2023

## HYDROLOGICAL REGIME OF WATER STREAMS AND THE PROBLEMS OF PUBLIC WATER SUPPLY IN THE REPUBLIC OF KALMYKIA

O.M. Pakhomova<sup>1</sup>, V.Yu. Grigoriev<sup>2</sup>, A.A. Sazonov<sup>3</sup>, E.S. Povalishnikova<sup>4</sup>, N.L. Frolova<sup>5</sup>

<sup>1-5</sup> *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology*

<sup>2-3</sup> *Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences*

<sup>1</sup> *Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: olpah@mail.ru*

<sup>2</sup> *Junior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: vadim308g@mail.ru*

<sup>3</sup> *Senior Lecturer, Ph.D. in Geography; e-mail: sazonov.lesha@gmail.com*

<sup>4</sup> *Senior Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: elenapovalishnikova@gmail.com*

<sup>5</sup> *Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: frolova\_nl@mail.ru*

The constant shortage of fresh water for drinking and municipal use in the Republic of Kalmykia has become critically acute recently. Both natural factors, i.e. increasing climate aridity, limited reserves of fresh surface and groundwater, lack of sufficiently long sections of large rivers with constant flow, and the deterioration of hydraulic structures are the reasons. The exploitation of groundwater in existing deposits has led to their depletion and deterioration, while large deposits of fresh and slightly brackish groundwater in the southern Caspian region cannot be used because the content of pollutants in them is rather high. Recovery of old and construction of new water pipelines from the Volga River requires permanent significant financial investments at the federal level. Therefore, recently a new way to increase the supply of fresh water suitable for drinking purposes, i.e. an artificial groundwater recharge (AGR), has been actively discussed. The article provides an actual assessment of water resources of the little-studied surface runoff of the rivers of Kalmykia, considers the possibility and feasibility of creating infiltration basins to replenish groundwater reserves, and calculates the parameters and operating mode of five planned basins.

The main source of fresh surface water in Kalmykia is the rivers of the Ergeni Upland. The average long-term flow from its eastern slope is estimated at 0,120 km<sup>3</sup>/year, from the western slope at 0,105 km<sup>3</sup>/year and from the southern slope at 0,045 km<sup>3</sup>/year. Trends in modern modification of the hydrological regime of rivers

under the influence of climate change have been revealed, namely a decrease in annual runoff and its intra-annual redistribution with a reduction of spring floods, a slight increase in winter runoff and a leveling of summer low-water periods. Calculation of the operating mode of planned infiltration basins allowed us to draw the following conclusions: the maximum possible volume of total infiltration will be about 220 thousand m<sup>3</sup>/year, which is 36 times less than the present-day water intake from the Troitsk and Bayarninsky fields for public water supply; sufficiently efficient operation of pools is only possible with annual cleaning of accumulated silt deposits, otherwise the soil filtration coefficient will come down each year, resulting in the reduction of infiltration supply by dozens times. Thus, the AGR can only be a temporary measure to compensate for the subsidence of groundwater level until the reconstruction and construction of new water pipelines from the Volga River to supply the city of Elista and the surrounding area with drinking water of acceptable quality.

**Keywords:** water resources, groundwater, Ergeni Upland, artificial recharge ponds, infiltration rate, hydrograph calculation, climate change

**Acknowledgements.** The work was carried out under the State Task of the Department of Land Hydrology, MSU Faculty of Geography, Part 2 I.10 Analysis, modeling and forecasting of changes in hydrological systems, water resources and land water quality (CITIS number 121051400038). Assessment of the possibility and feasibility of creating infiltration basins for groundwater recharge was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 21-47-00008). The climatic analysis was carried out under the Development Program of the Interdisciplinary Scientific–Educational School of the Lomonosov Moscow State University “The Future of the Planet and Global Environmental Changes” (“Climate and Environment”). Part of data were collected and processed under the State Task of the Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences (Theme FMWZ-2022-0001).

## REFERENCES

- Atlas raschetnykh gidrologicheskikh kart i nomogramm* [Atlas of calculated hydrological maps and nomograms], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1986, 23 p.
- Barabanov A.T., Dolgov S.V., Koronkevich N.I. Effect of Present-Day Climate Changes and Agricultural Activities on Spring Overland Runoff in Forest-Steppe and Steppe Regions of the Russian Plain, *Water Resources*, 2018, vol. 45, no. 4, p. 447–454.
- Bembeyev A.V., Schipicyn M.N. Ocenka ekspluatatsionnykh zapasov presnykh i solonovatykh podzemnykh vod na territorii Respubliki Kalmykiya [Estimation of the operational reserves of fresh and brackish groundwater in the territory of the Republic of Kalmykia], *Juzhno-rossijskij vestnik geologii, geografii i global'noj energii*, 2005, no. 1(10), p. 71–86. (In Russian)
- Blöschl G., Hall J., Viglione A. Changing climate both increases and decreases European river floods, *Nature*, 2019, vol. 573, p. 108–111, DOI: 10.1038/s41586-019-1495-6.
- Bouwer H. *Groundwater hydrology*, McGraw-Hill, New York, 1978, 480 p.
- Bouwer H., Back J.T., Oliver J.M. Predicting infiltration and ground water mounting for artificial recharge, *Journal Hydrol. Eng., Am. Soc. Civil. Eng.*, 1999, vol. 4(4), p. 350–357.
- Curkan S.Ja. *Ocenka uslovij formirovaniya i vozmozhnosti iskusstvennogo popolneniya resursov podzemnykh vod Kalmykii dlja ih racional'nogo ispol'zovaniya* [Assessment of the conditions of formation and the possibility of artificial replenishment of groundwater resources of Kalmykia for their rational use], Ph.D. Thesis in Geology and Mineralogy, Moscow, VSEGINGEO Publ., 1993a, 240 p. (In Russian)
- Curkan S.Ja. *Usloviya formirovaniya resursov presnykh podzemnykh vod Kalmykii* [Conditions for the Formation of Fresh Groundwater Resources in Kalmykia], *Geoinformmarkt*, Moscow, 1993b, iss. 8, p. 29–34. (In Russian)
- Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Barabanova E.A. Landscape-hydrological changes in the Don basin, *Water Resources*, 2020, vol. 47, no. 6, p. 934–944, DOI: 10.1134/S0097807820060056.
- Dzhamalov R.G., Kireeva M.B., Kosolapov A.E., Frolova N.L. *Vodnye resursy basseina Dona i ikh ekologicheskoe sostoyanie* [Water resources of the Don basin and their ecological state], Moscow, GEOS Publ., 2017, 204 p. (In Russian)
- Gabunshhin S.V. *Ekologicheskaja bezopasnost' Rossii na regional'nom urovne (na materialah respubliki Kalmykiya)* [Environmental safety of Russia at the regional level (based on the materials of the Republic of Kalmykia)], Rostov-on-Don, SKNC VSh JuFU Publ., 2009, 192 p. (In Russian)
- Gidrohimicheskij stok rek Evropejskoj chasti Rossii. Atlas* [Hydrochemical runoff of rivers in the European part of Russia. Atlas], R.G. Dzhamalov, O.S. Reshetnjak, M.M. Trofimchuk (eds.), Moscow, IVP RAN Publ., 2020, 155 p. (In Russian)
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 Global Reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, DOI: 10.1002/qj.3803.
- Iskusstvennoe popolnenie zapasov gruntovykh vod pri reshenii problemy vodosnabzheniya v Kalmykii [Artificial replenishment of groundwater reserves in solving the problem of water supply in Kalmykia], *Nedra Povolzh'ja i Prikaspija*, Saratov, 2005, iss. 41, p. 29–34. (In Russian)
- Khochaeva S.S., Vasil'eva P.D. O problemakh ispol'zovaniya vodnykh ob'ektov Kalmykii, yavlyayushchikhsya istochnikami vodosnabzheniya [On the problems of using water bodies in Kalmykia, which are sources of water supply], *Nauka i biznes: puti razvitiya*, 2017, no. 12, p. 68–73. (In Russian)
- Kireeva M.B., Frolova N.L., Dzhamalov R.G., Rets E.P., Povalishnikova E.S., Pakhomova O.V. Low flow on the rivers of the European part of Russia and its hazards, *Geography, Environment, Sustainability*, 2016, vol. 9, no. 4, p. 33–47, DOI: 10.15356/2071-9388\_04v09\_2016\_03.
- Kireeva M.B., Frolova N.L., Rets E.P. et al. Evaluating climate and water regime transformation in the European

- part of Russia using observation and reanalysis data for the 1945–2015 period, *International Journal of River Basin Management*, 2019, vol. 18, no. 4, p. 491–502, DOI: 10.1080/15715124.2019.1695258.
- Koronkevich N.I. Vodnyj balans Russkoj ravniny i ego antropogennye izmenenija [Water balance of the Russian Plain and its anthropogenic changes], Moscow, Nauka Publ., 1990, 205 p. (In Russian)
- Koronkevich N.I., Georgiadi A.G., Dolgov S.V., Barabanova E.A., Kashutina E.A., Miljukova I.P. Izmenenie stoka snegovogo polovod'ja na juzhnom makrosklone Russkoj ravniny v period 1930–2014 gg. [Change in snow flood flow in the southern macro-slope of the Russian Plain in the period 1930–2014], *Led i sneg*, 2018, vol. 58, no. 4, p. 498–506. (In Russian)
- Mahota T.A., Ershov G.E. *Pereocenka ekspluatacionnyh zasposov presnyh podzemnyh vod Troickogo i Bajartinskogo mestorozhdenij dlja municipal'nyh nuzhd g. Eliste Respubliki Kalmykija*, v 6 kn. i 1 papke [Reassessment of operational fresh groundwater reserves of the Troitskoye and Bayartinskoye deposits for municipal needs in the city of Elista of the Republic of Kalmykia, in 6 books and 1 folder], book 1, 2010, 192 p. (In Russian)
- Massmann J.W., Butchart C., Stolar S. *Infiltration Characteristics, Performance, and Design of Stormwater Facilities*, Final Research Report, Research Project T1803, Task 12, Washington State Department of Transportation, Olympia, Washington, 2003.
- Mimishev A.A., Ochirova A.N., Kirilaev V.A., Sharaeva B.M., Dzhali'chinova T.B. Analiz osnovnyh istochnikov pit'evogo vodosnabzhenija na territorii Respubliki Kalmykii [Analysis of the main sources of drinking water supply over the territory of the Republic of Kalmykia], *Geologija, geografija i global'naja energija*, 2018, no. 2(69), p. 26–39. (In Russian)
- Plotnikov N.A. *Proektirovanie sistem iskusstvennogo vospolnenija podzemnyh vod dlja vodosnabzhenija* [Engineering of artificial groundwater replenishment systems for water supply], Moscow, Strojizdat Publ., 1983, 230 p. (In Russian)
- Polonskij A.B., Basharin D.V. Vlijanie klimaticeskogo sdviga 1976–1977 gg. na krupnomasshtabnuju strukturu prizemnyh meteorologicheskikh polej Evrazii [Impact of climate shift 1976–1977 on the large-scale structure of the surface meteorological fields of Eurasia], *Meteorologija i gidrologija*, 2008, no. 5, p. 16–30. (In Russian)
- Rekomendatsii po raschetam vnutrigodovogo raspredelenija stoka pri stroitel'nom proektirovanii* [Recommendations for calculating intra-annual flow distribution during construction design], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975, 72 p. (In Russian)
- SNiP 2.01.14-83. *Opreделение raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Determination of calculated hydrological characteristics], USSR State Committee for Construction Affairs, Moscow, Stroyizdat Publ., 1985. 36 p. (In Russian)
- SP-33-101-2003. *Svod pravil po proektirovaniju i stroitel'stvu. Opreделение osnovnyh raschetnyh gidrologicheskikh kharakteristik* [A set of rules for design and construction. Determination of the main calculated hydrological characteristics], Moscow, Gosstroj Rossii Publ., 2004, 72 p. (In Russian)
- Varentsova N.A., Grechushnikova M.G., Povalishnikova E.S., Kireeva M.B., Kharlamov M.A., Frolova N.L. Vlijanie klimaticeskikh i antropogennykh faktorov na vesennii stok v basseine Dona [Assessment of climatic and anthropogenic impact on spring runoff in the Don River basin], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2021, no. 5, p. 91–108. (In Russian)
- Varentsova N.A., Kireeva M.B., Kharlamov M.A., Varentsov M.I., Frolova N.L., Povalishnikova E.S. Formirovanie vesennego stoka rek ETR: osnovnye faktory i sposoby ikh ucheta, I. Obzor issledovanij [Formation of spring runoff of rivers in the EPR: main factors and methods of taking them into account, I. Review of research], *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, 2022, vol. 384, no. 2, p. 92–116, DOI: 10.37162/2618-9631-2022-2-92-116. (In Russian)
- Vodnye resursy Rossii i ikh ispol'zovanie* [Water resources of Russia and their use], I.A. Shiklomanov (ed.), Sankt-Petersburg, Gosudarstvennyi gidrologicheskii institut Publ., 2008, 600 p. (In Russian)
- Zektser I.S., Potapova E.Y., Chetverikova A.V., Shtengelov R.S. Perspectives of artificial recharge of groundwater in southern European Russia, *Water Resources*, 2012, vol. 39, no. 6, p. 672–684, DOI: 10.1134/S0097807812060085.
- Web sources*
- Avtomatizirovannaja informacionnaja sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnyh ob'ektov (AIS GMVO). Ministerstvo prirodnyh resursov i jekologii Rossijskoj Federacii Federal'noe agentstvo vodnyh resursov [Automated information system for state monitoring of water bodies (AIS GMVO). Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation Federal Agency for Water Resources], URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (data access 15.11.2022). (In Russian)
- O regional'noi kompleksnoi programme "Chistaya voda" na 2009–2022 gody*. Elektronnyi fond Konsortsium "Kodeks" [About the regional comprehensive program "Clean Water" for 2009–2022, Electronic fund Consortium "Code", URL: <https://docs.cntd.ru/document/460201863> (access date 20.04.2023). (In Russian)
- Ran'kova E.Ya., Gruza G.V., Rocheva E.V., Samokhina O.F. Temperatura prizemnogo vozdukhha [Surface air temperature], *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossijskoj Federatsii* [Second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation], Moscow, 2014, p. 37–72, URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2016/od2/od2.pdf> (access date 04.04.2023). (In Russian)
- Spravka o sovremennom sostoyanii podzemnykh vod i opasnykh ekzogennykh geologicheskikh protsessov na territorii Respubliki Kalmykiya v 2022 g.* [Information on the current state of groundwater and hazardous exogenous geological processes in the territory of the Republic of Kalmykia in 2022], URL: <http://geomonitoring.ru/download/spravki/yfo/%D0%A1%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BA%D0%B0%20%D0%A0%D0%B5%D1%81%D0%BF%D1%83%D0%B1%D0%BB%D0%B8%D0%BA%D0%B0%20%D0%9A%D0%B0%D0%BB%D0%BC%D1%8B%D0%BA%D0%B8%D1%8F.pdf?ysclid=lm9j3ogumm441606806> (access date 20.04.2023). (In Russian)
- Stroitel'stvo vodoprovoda ot Volgi do Kalmykii* [Construction of a water pipeline from the Volga to Kalmykia], Government of the Republic of Kalmykia, 2022, URL: <http://kalmregion.ru/novosti/stroitelstvo-vodoprovoda-ot-volgi-do-kalmykii/> (access date 15.06.2022). (In Russian)

- Shema kompleksnogo ispol'zovanija i ohrany vodnyh ob'ektov besstochnyh rajonov mezhdurech'ja Tereka, Dona i Volgi* [Scheme of the integrated use and protection of water bodies of drainless areas of the interfluvium of the Terek, Don and Volga], book 2, 2014, 29 p., URL: <http://zkbvu.ru/upload/medialibrary/3f3/3f36ebd80fb8bf333e01ac51fb2aec5.pdf> (access date 10.04.2023). (In Russian)
- ERA5-Land, *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), URL: <https://www.ecmwf.int/en/era5-land> (access date 14.02.2022).
- GlobSnow, GlobSnow v.3.0, Finnish Meteorological Institute, ESA, URL: <https://www.globsnow.info/> (access date 14.02.2022).
- IPCC, Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013, Hartmann D., Klein Tank A., Rusticucci M. et al., chapter 2, Observations: Atmosphere and Surface, p. 159–254, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, URL: [https://www.researchgate.net/publication/262677624\\_IPCC\\_2013\\_Climate\\_Change\\_2013\\_in\\_The\\_Physical\\_Science\\_Basis\\_Working\\_Group\\_I\\_Contribution\\_to\\_the\\_Fifth\\_Assessment\\_Report\\_of\\_the\\_Intergovernmental\\_Panel\\_on\\_Climate\\_Change\\_WMOUNEP\\_Cambridge](https://www.researchgate.net/publication/262677624_IPCC_2013_Climate_Change_2013_in_The_Physical_Science_Basis_Working_Group_I_Contribution_to_the_Fifth_Assessment_Report_of_the_Intergovernmental_Panel_on_Climate_Change_WMOUNEP_Cambridge) (access date 15.04.2023).

Received 05.08.2023

Revised 25.09.2023

Accepted 06.10.2023