

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.3:556.5

ИСКУССТВЕННОЕ ПОПОЛНЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД РЕСПУБЛИКИ КАЛМЫКИИ: ИСТОЧНИКИ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ¹

© 2023 г. Л. С. Рыбникова^а, *, М. Г. Морозов^б, П. А. Рыбников^а,
Н. Л. Фролова^с, А. В. Комин^д

^аИнститут горного дела Уральского отделения РАН,
Екатеринбург, 620075 Россия

^бУральский научный проектно-экспертный центр горного дела и гидротехники,
Екатеринбург, 620072 Россия

^сМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, 119991 Россия

^дРоссийский научно-исследовательский институт комплексного использования
и охраны водных ресурсов, Екатеринбург, 620049 Россия

*e-mail: luserib@mail.ru

Поступила в редакцию 12.07.2022 г.

После доработки 02.12.2022 г.

Принята к публикации 04.09.2023 г.

Территория Республики Калмыкии расположена в северо-западной части Прикаспия и относится к числу маловодных регионов. Вопрос обеспечения водными ресурсами здесь чрезвычайно актуален. Важную роль играют подземные воды — основной и часто единственный источник питьевого водоснабжения. Однако их использование ограничено из-за низкого природного качества. Одним из способов увеличения эксплуатационных запасов подземных вод может стать их искусственное пополнение. РосНИИВХ в период 2020–2021 гг. изучена возможность пополнения водных ресурсов подземных водных объектов республики Калмыкии за счет аккумуляции поверхностного стока. По результатам работ сделан вывод о том, что искусственное пополнение подземных вод на территории Республики Калмыкии нецелесообразно, так как даже в годы 50%-й обеспеченности объема поверхностного стока будет недостаточно для распреснения подземных вод в течение года до требуемых нормативов (минерализация ≤ 1.0 г/дм³). Создание постоянной линзы пресных вод (наличие которой особенно важно в маловодные годы) в водоносном горизонте на участке инфильтрационный бассейн — водозаборная скважина невозможно, поскольку ежегодно будет происходить ее полная сработка.

Ключевые слова: подземные воды, паводок, ресурсы, линза пресных вод, инфильтрационный бассейн, ергенинский горизонт, запасы подземных вод, качество воды, системы ИППВ, моделирование.

DOI: 10.31857/S0321059623700049, **EDN:** NPJVLS

ВВЕДЕНИЕ

Территория Республика Калмыкии (население 272.7 тыс. человек) — засушливый вододефицитный регион России. Ежегодная потребность в воде составляет в среднем ~800 млн м³, из которых лишь 50 млн м³ поступает из собственных водоемных объектов, остальные водные ресурсы — из сопредельных территорий других регионов [1, 4].

Население республики обеспечивается питьевой водой из 46 источников централизованного

водоснабжения (12 водоемов 1-й категории и 34 подземных источника), 15% населения пользуется водой из 137 нецентрализованных источников и 12% обеспечиваются водоснабжением посредством подвоза воды. В целом потребность в хозяйственно-питьевой воде не удовлетворяется, дефицит в настоящее время составляет 70 тыс. м³/сут [12]. Вода в поверхностных водных объектах Республики Калмыкии (реки, озера, пруды и водохранилища), как правило, сильно минерализована, неудовлетворительного качества по микробиологическим показателям.

Калмыкия обеспечивается водой из бассейнов рек Волги, Кубани, Кумы, Терека и Чограйского

¹ Разделы статьи, связанные с методикой геофильтрационного и геомиграционного моделирования, подготовлены в рамках государственного задания ИГД УрО РАН (тема 075-00412-22 ПР).

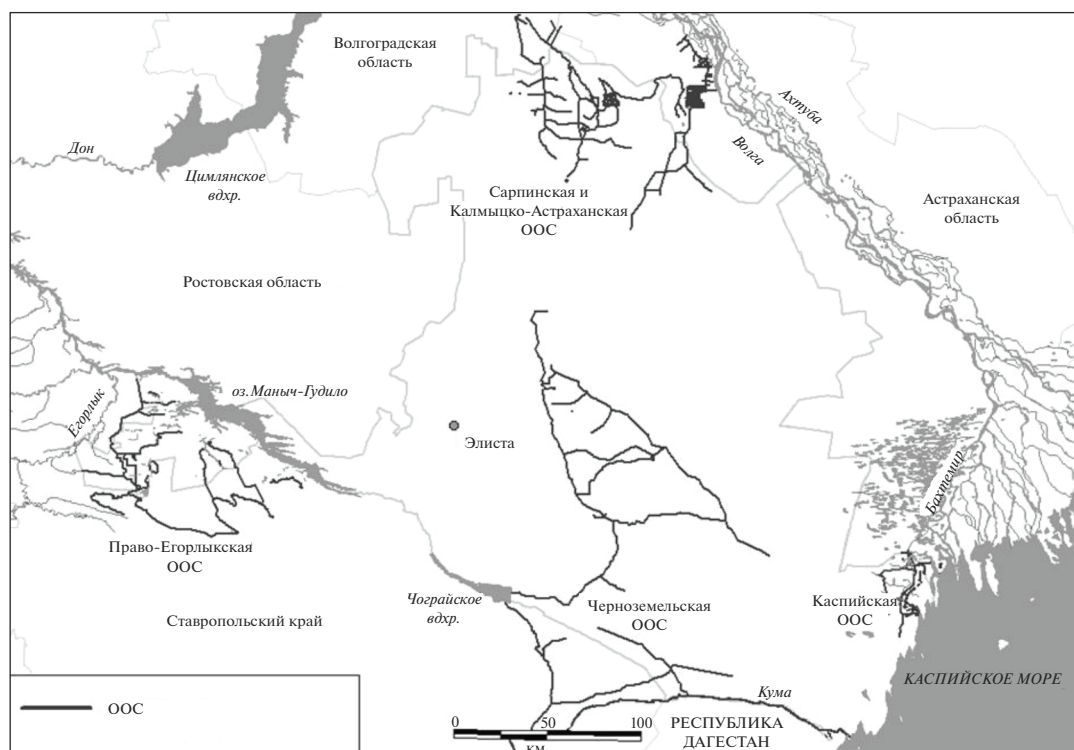


Рис. 1. Оросительно-обводнительные системы (ООС) Республики Калмыкии [9].

водохранилища (рис. 1) [9]. В Прикаспийской низменности и Кумо-Манычской впадине встречаются лишь мелководные соленые озера (Сарпинские, Состинские, Маныч-Гудило и др.). После опреснения используются воды северной части Каспийского моря. Запасы собственных поверхностных вод расходуется в основном для сельскохозяйственных нужд, а подземные воды обладают повышенной минерализацией и жесткостью [1].

Протяженность централизованных систем водоснабжения и групповых водопроводов составляет 1300 км [10]. Большая часть магистральных водоводов, разводящих водопроводных сетей и водозаборных сооружений построены более 20–30 лет назад, крайне изношены и не отвечают эксплуатационным требованиям [1].

Среднее водопотребление на одного человека составляет ~105 л в сутки [10], что намного ниже расчетной нормы (174 л). Вне пределов Ергенинской возвышенности водопотребление катастрофически низкое – <8 л в сутки на человека.

Цель работы – научное обоснование возможности искусственного пополнения водных ресурсов (ИППВ) водоносного горизонта в пределах Ергенинской возвышенности за счет аккумуляции паводкового поверхностного стока.

Объект исследования – водоносные горизонты Ергенинской возвышенности.

В процессе настоящей работы выполнены: анализ результатов работ по применению ИППВ в мире, в Российской Федерации и в Республике Калмыкии; оценка обеспеченности Калмыкии подземными и поверхностными водными ресурсами; опытно-экспериментальные работы по искусственному пополнению ергенинского водоносного горизонта на первой очереди Верхнеяшкульского водозабора; анализ балансовых составляющих эксплуатационных запасов при ИППВ методами математического моделирования; оценка возможности и эффективности ИППВ.

АНАЛИЗ РАБОТ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ИППВ

Необходимость в искусственном пополнении эксплуатационных запасов подземных вод возникает, когда водоотбор на месторождениях подземных вод не обеспечивается естественными источниками формирования эксплуатационных запасов. При этом происходит прогрессирующее снижение динамического уровня подземных вод, развитие депрессионных воронок, возникает опасность негативных экологических последствий. В этой ситуации возможны два выхода [6, 7]:

расширить действующий водозабор на флангах, однако это далеко не всегда можно сделать (дорогая земля, наличие некондиционных вод, сложность организации зоны санитарной охраны и т. п.);

применить искусственное пополнение эксплуатационных запасов подземных вод.

Наиболее активно ИППВ применяется в странах Западной Европы, а также в США, Израиле, Австралии, Южно-Африканской Республике, Индии и др. Во многих странах с помощью систем ИППВ обеспечивается до 25–50% общего хозяйственно-питьевого водопотребления. В странах Западной Европы, как правило, используются сооружения береговой инфильтрации и инфильтрационные бассейны. В США, Австралии, Израиле наряду со схемами поверхностной инфильтрации широко применяются скважинные схемы пополнения запасов подземных вод.

В Российской Федерации доля ИППВ в общем объеме потребления подземных вод невелика: в 1970-х гг. она составляла ~3% и вряд ли существенно увеличилась [1–3, 11].

Кроме использования в схемах ИППВ естественных водных ресурсов, широкое применение нашло использование сточных вод. Так, в более чем 400 городах США очищенные сточные воды поступают на орошение земель и ИППВ [14]. В Израиле ~95% общего объема сточных вод собирается, 80% очищается и 42% повторно используется для нужд ирригации [14].

Одна из проблем, осложняющих использование ИППВ, — кольматаж инфильтрационных бассейнов и нагнетательных скважин, несмотря на специальную водоподготовку. Длительность фильтроцикла составляет в разных условиях 3–6 мес., после чего должна проводиться чистка бассейна.

Возможность искусственного пополнения подземных вод конкретных водозаборов или участков месторождений подземных вод определяется сочетанием трех основных факторов:

наличием потребности в ИППВ;

наличием источника пополнения, его близостью и качеством воды;

наличием необходимой емкости в водоносном горизонте или зоне аэрации для “приема” дополнительного количества воды.

Рассмотрим эти факторы применительно к территории Калмыкии на примере Троицкого месторождения подземных вод. Наличие потребности в искусственном пополнении подземных вод не вызывает сомнений. Источником пополнения подземных вод может выступить поверхностный сток во время зимне-весеннего половодья. В соответствии с материалами государственного мониторинга состояния недр установлено, что в результате многолетней эксплуатации Троицкого месторождения подземных вод образовалась локальная депрессионная воронка площадью ~40 км² [8]. Для искусственного пополнения

запасов подземных вод здесь могут использоваться поверхностные воды.

В 2020–2021 гг. РосНИИВХ в рамках работ по изучению возможности пополнения водных ресурсов подземных водных объектов Республики Калмыкии была выбрана Ергенинская возвышенность Республики Калмыкии по сочетанию всех возможностей ИППВ.

ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ РЕСПУБЛИКИ КАЛМЫКИИ ПОДЗЕМНЫМИ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ

В гидрогеологическом плане рассматриваемая территория охватывает западную часть Северо-Каспийского артезианского, юго-восточную часть Ергенинского и северную часть Восточно-Предкавказского артезианских бассейнов (АБ) (рис. 2). Ергенинский АБ приурочен к хорошо выраженной в рельефе Ергенинской возвышенности [8]. Геологический разрез представлен отложениями палеозойского, мезозойского и кайнозойского возраста.

Водоснабжение населения Республики Калмыкии организовано за счет подземных (58%) и поверхностных (42%) вод. Основным источником для централизованного водоснабжения являются подземные воды ергенинского, сарматского и понтического водоносных горизонтов.

Балансовые запасы подземных вод оценены по 21 месторождению и составляют 69.41 тыс. м³/сут; из них питьевые подземные воды — 57.04 тыс. м³/сут. Освоены только 12 месторождений (участков) подземных вод. Обеспеченность разведанными эксплуатационными запасами подземных вод — 0.255 м³/сут на 1 человека. Степень освоения запасов подземных вод по территории Республики Калмыкии составляет 34.8%, прогнозных ресурсов — 1.5% [8, 13].

Подземные воды характеризуются в основном высокой минерализацией — от 3 до 53 г/дм³, чаще 10–25 г/дм³, и жесткостью от 5 до 60 ммоль. Пресные и солоноватые подземные воды имеют ограниченное распространение и залегают в виде линз среди более минерализованных подземных вод. Подземные воды более глубоких напорных горизонтов практического значения почти не имеют из-за большой глубины и высокой минерализации.

Основные источники водоснабжения столицы Республики Калмыкии г. Элисты — Троицкое и Баяртинское месторождения подземных вод, расположенные в 18 и 55 км к С. Запасы питьевых подземных вод были утверждены в 1961 г., перетверждены в 2011 и в 2021 гг. В 2019 г. среднесуточный водоотбор на Троицком месторождении составил 21.06 тыс. м³/сут (при утвержденных запасах).

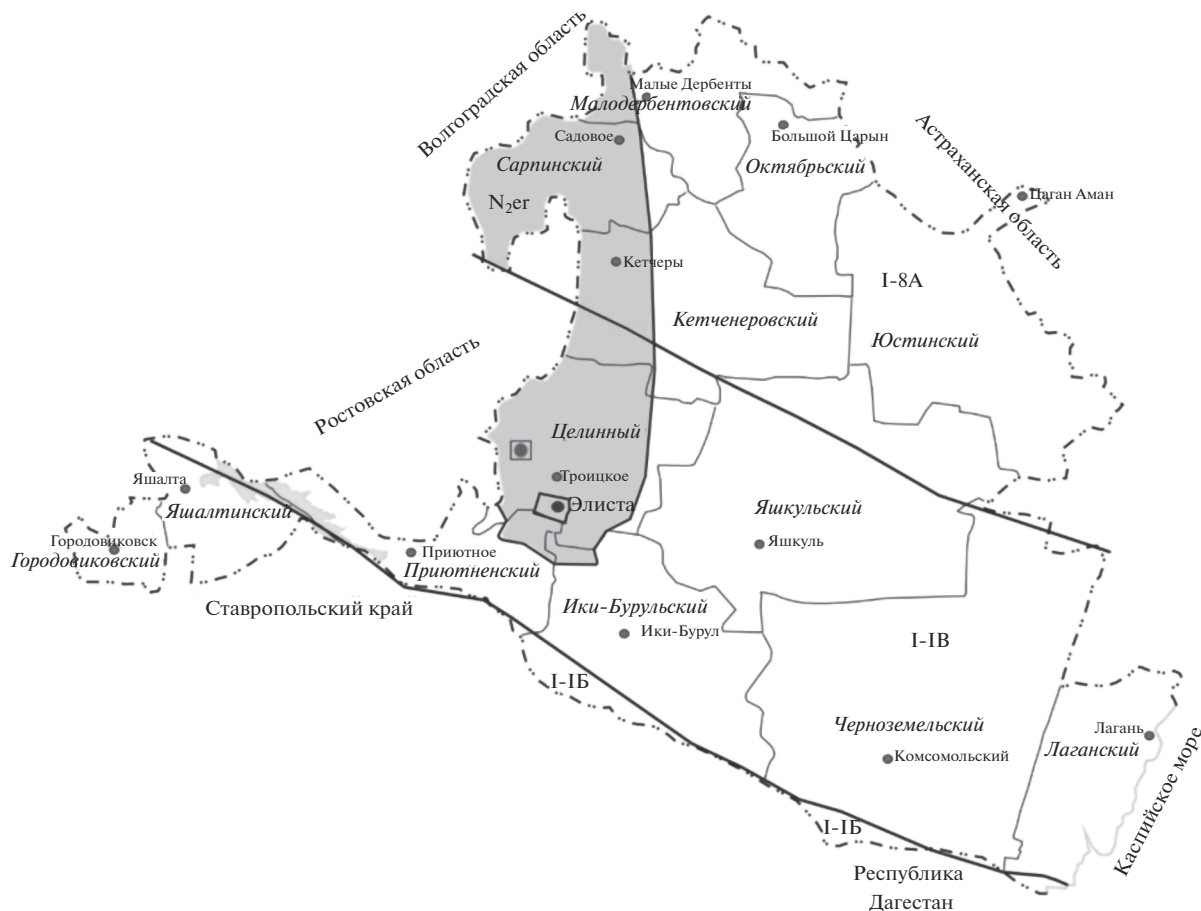


Рис. 2. Гидрогеологическое районирование территории Республики Калмыкии. Гидрогеологические структуры II порядка, артезианский бассейны: I-IA – Азово-Кубанский, I-IB – Восточно-Предкавказский, I-IB – Ергенинский, I-8A – Северо-Каспийский.

сах 25.9 тыс. м³/сут), на Баяртинском месторождении 4.44 тыс. м³/сут (при запасах 20.0 тыс. м³/сут). В Элисту подается вода в объеме 10 тыс. м³/сут – в 2.5 раза меньше, чем отбирается. В 2019 г. величина сухого остатка воды на Троицком водозаборе составила 1.91 г/дм³ (на момент разведки было 1.0–1.5 г/дм³), на Баяртинском – 1.17 г/дм³.

В резервуаре чистой воды состав воды не соответствует требованиям СанПиН (по показателям общей жесткости 1.2 ПДК, содержанию хлоридов 1.4 ПДК, сульфатов 1.3 ПДК, магния 1.3 ПДК, сухого остатка до 1.9 ПДК).

Использование для питьевых целей некондиционных подземных вод 30.11.2020 согласовано с главным государственным санитарным врачом по Республике Калмыкии на 2 года, в течение которых недропользователю необходимо разработать и ввести в эксплуатацию технологическую схему очистки подземных вод и доведения их качества до нормируемых показателей. Запасы Ба-

яртинского месторождения не переутверждались и в настоящее время не используются.

ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ РЕСПУБЛИКИ КАЛМЫКИИ ПОВЕРХНОСТНЫМИ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ

Калмыкия относится к одному из самых засушливых регионов на Европейской территории России. Годовое количество осадков составляет 210–340 мм. Статистический анализ показал значимое увеличение как атмосферных осадков, так и температуры воздуха за теплый и холодный периоды начиная с 1990 г.

Характеристики поверхностного стока изучены в основном на Ергенинском возвышенности. В настоящее время на территории Республики Калмыкии расположен единственный действующий гидрологический пост – в пгт Советский – балка Амга-Бургуста. Ранее в пределах территории Калмыкии располагались еще 3 поста гидрологи-

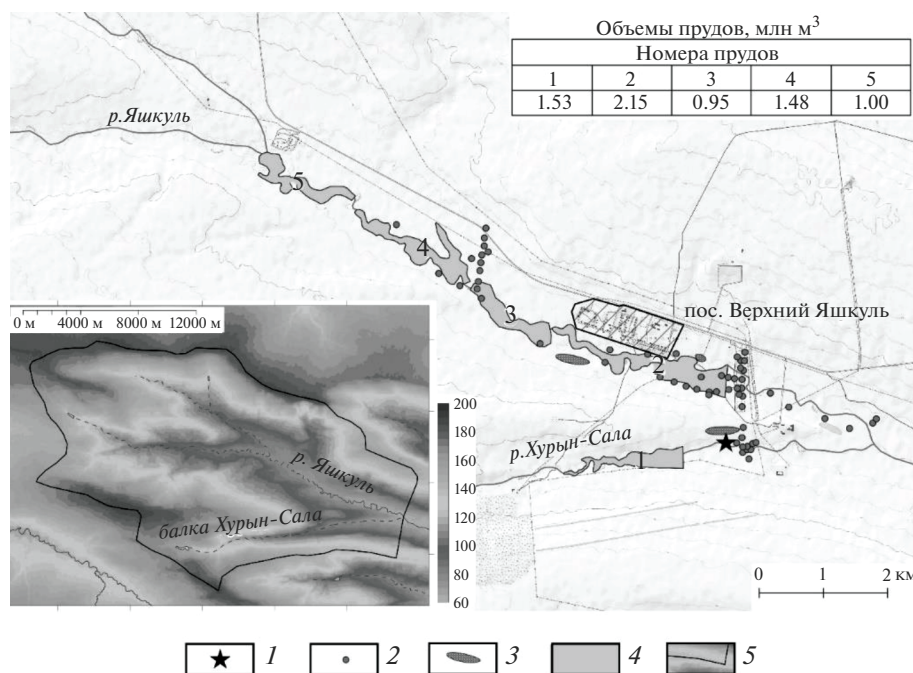


Рис. 3. Размещение проектируемых водохранилищ в районе Троицкого месторождения подземных вод. 1 — участок проведения опытно-экспериментальных работ, 2 — эксплуатационные скважины, 3 — выходы песков ергенинской свиты, 4 — проектируемые пруды, 5 — граница водосборной площади р. Яшкуль.

ческих наблюдений: в пос. Годжур (Аршань-Зельмень, период работы 1956–1971 гг.), в совхозе Приволжский (балка Малая Тингута, 1962–1988 гг.) и г. Улан-Эрге на р. Яшкуль (1956–1964 гг.). В связи с недостаточными исходными гидрологическими данными, глобальными изменениями климата и возросшим хозяйственным освоением территории существует необходимость дополнительного изучения и прогнозирования изменений количественных и качественных характеристик поверхностного стока как возможного источника пополнения подземных вод.

С точки зрения регулирования стока и восполнения запасов подземных вод изменение режима стока рек Ергенинской возвышенности имеет как положительные, так и отрицательные последствия. Основным отрицательным последствием является уменьшение объемов талого стока, который не только составляет большую часть годового стока, но и, вероятнее всего, имеет меньшую по сравнению с дождевыми и подземными водами минерализацию. Положительные моменты связаны с тем, что сток внутри сезона стал более равномерным, что позволит обойтись меньшим объемом прудов при регулировании. Смещение дат прохождения основного объема стока на более ранние сроки дает возможность осуществить большую часть работ по восполнению подземных вод вне периодов активного развития водной растительности.

Основой для оценки возможного объема водохранилищ служит объем стока за весеннее половодье. Исходя из карт и методик СНиП и СП, средний объем стока половодья (без учета потерь на фильтрацию и испарение) составляет для створа Яшкуль–Троицкое – 5.65 млн м³ (при планируемом объеме водохранилища 3.0–3.5 млн м³), для устья балки Хурын-Сала – 1.04 млн м³ (при планируемом объеме водохранилища 1.0–1.5 млн м³) (рис. 3).

На первый взгляд, полученные объемы стока 50%-й обеспеченности соответствуют планируемым объемам водохранилищ. Однако при проектировании капитальных сооружений, в частности плотин, высотой 4–5 м следует учитывать как минимум несколько важных факторов:

полученные расходы рассчитаны для максимальных срочных расходов, что неизбежно приводит к завышению результатов;

используемые карты СП-2003 и СНиП-1983 составлялись в основном в 1980-х гг., однако с 1980-х гг. сток уменьшился;

при расчете в качестве аналогов использовались всего 2 гидропоста, при этом площадь водосбора в замыкающем створе недостаточно велика для того, чтобы безоговорочно принять их аналогом для р. Яшкуль;

при существующей межгодовой и внутригодовой неравномерности стока и прогнозируемом

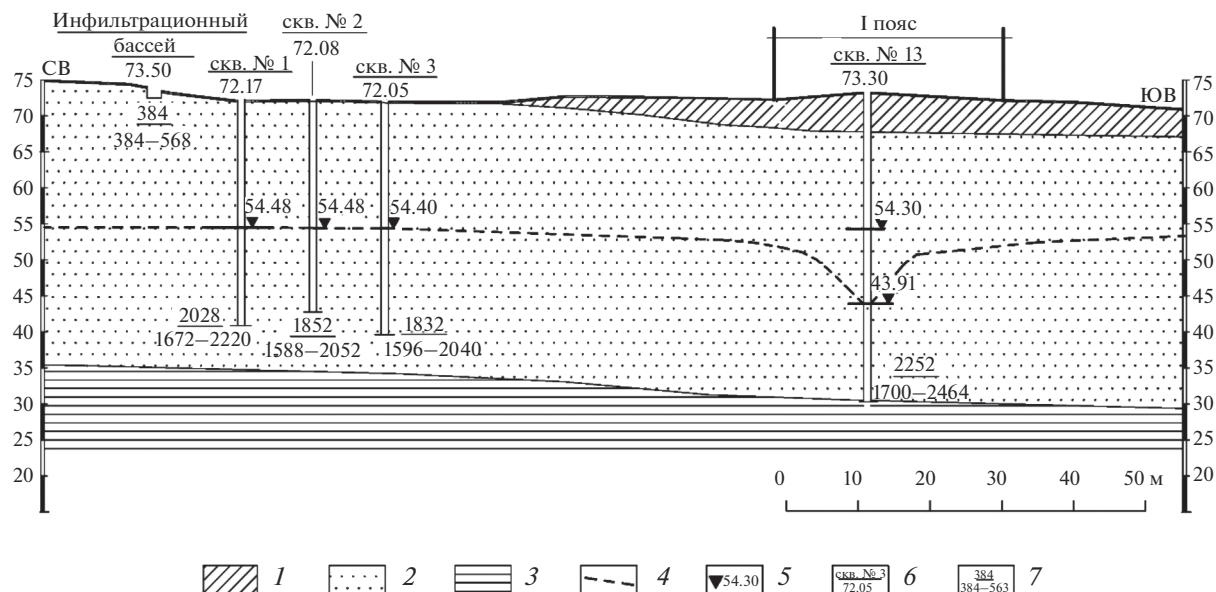


Рис. 4. Гидрогеологический разрез по ленте тока “инфильтрационный бассейн – эксплуатационная скважина” 13. 1 – суглинок плотный (vd QIII–IV), 2 – песок серый разнотерный (aN_{2er}), 3 – глина серая вязкая (P₃), 4 – динамический уровень подземных вод, 5 – статический уровень подземных вод, 6 – номер скважины и высота устья, 7 – минерализация подземных вод, мг/л; числитель – до начала опытных работ, знаменатель – диапазон изменения в период проведения опытных работ.

количестве маловодных лет необходимо предусмотреть как возможное отсутствие необходимого количества воды в маловодные периоды, так и его избыток (и возможный размыв земляных плотин и дамб) в редкие, но периодически наблюдаемые многоводные годы.

ОПЫТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ

Инфильтрационный бассейн площадью 10 м² (5 м × 2 м) был оборудован на участке выхода песков ергенинского водоносного горизонта на поверхность. Участок расположен в пределах ленты тока, сформированной водоотбором из эксплуатационной скв. 13э на расстоянии 130 м от нее, на склоне балки Хурын-Сала (рис. 3, 4). Дебит водоотбора 2 тыс. м³/сут.

Регламент проведения работ был обоснован с использованием разведочного моделирования [16].

Программа опытно-экспериментальных работ по ИППВ была следующей:

заполнение инфильтрационного бассейна водой, доставленной из скважины ООО “Родники Калмыкии”; длина бассейна 5 м, ширина 2 м, глубина 1 м (рис. 5);

замеры уровня воды в инфильтрационном бассейне, в наблюдательных скв. 1–4 и эксплуатационной скв. 13э (2 раза в сутки);

снятие показаний расходомера, установленного на эксплуатационной скв. 13э (1 раз в сутки);

определение pH, электрической проводимости, содержания солей и температуры воды (2 раза в сутки); отбор пробоотборником воды в объеме 100 мл для проведения экспресс-анализа прибором “EAC waterproof Combo By HANNA”;

выполнение санитарно-гигиенических и бактериологических исследований проб воды в Центре гигиены и эпидемиологии в Республике Калмыкии (1 раз в 5 дней); объем пробы 2.0 л.

Инфильтрационный бассейн наполнялся водой из эксплуатационной скв. 35-2 ООО “Родники Калмыкии”, общий объем составил 968 м³, минерализация в процессе налива варьировала от 294 до 447 мг/дм³, pH изменялся от 7.33 до 8.29. Налив продолжался 47 дней (с 2.11.2021 по 17.12.2021) с небольшим перерывом (с 26.11.2021 до 02.12.2021) из-за распутицы после дождей и выхода из строя скв. 35 ООО “Родники Калмыкии”. Анализ результатов опытно-экспериментальных работ показал, что вследствие заполнения емкости зоны аэрации произошло быстрое снижение поглотительной способности инфильтрационного бассейна с 20 (2.11.2021) до 2.5 м/сут (с 5.11.2021 и до конца опыта 17.12.2021).

Объем профильтровавшейся воды небольшой, существенного влияния на уровни основного водоносного горизонта налив не оказал, изменения уровней не превышали нескольких сантиметров.



Рис. 5. Подача воды из заполненных емкостей (30 м^3) в инфильтрационный бассейн с отрегулированным расходом (для автоматического заполнения в течение суток).

Минерализация воды в скв. 1 снизилась с 2 до 1.7 г/дм^3 к 29.11.2021, затем из-за перерыва в наливе произошло увеличение до 1.8 г/дм^3 . В скв. 2 распреснение проявляется менее отчетливо. В скв. 3 на первом этапе наблюдалось небольшое распреснение, которое затем сменилось резким скачком минерализации. В эксплуатационной скв. 13э не удалось установить каких-либо закономерностей изменения минерализации и других показателей химического состава.

Необходимо отметить достаточно хаотичное и незакономерное изменение минерализации во всех наблюдательных скважинах. До начала опытно-экспериментальных работ (12.10.2021) минерализация менялась от 1.83 (скв. 3) до 2.25 г/дм^3

(скв. 13э); к окончанию налива (16.12.2021) — от 1.77 (скв. 3) до 2.27 г/дм^3 (скв. 4).

Для рассматриваемой территории в принципе характерна весьма значительная изменчивость химического состава по площади (табл. 1). Так, по данным единовременного опробования 06.11.2019, значения минерализации в расположенных рядом эксплуатационных скважинах участка Хурын-Сала варьировали от 2.3 (скв. 13э) до 2.85 г/дм^3 (скв. 11э). Минерализация в скв. 13э в течение года (при незначительных колебаниях расхода) менялась от 1.85 до 2.3 г/дм^3 . Такая заметная гидрохимическая изменчивость проявилась и при проведении опытно-экспериментальных работ, что затрудняет их обработку и интерпретацию.

Таблица 1. Результаты химических анализов проб воды из эксплуатационных скважин Верхнеяшкульского водозабора Троицкого МПВ (балка Хурын-Сала)

Показатели	Единицы измерения	ПДК	Номера скважин и даты опробования					
			8э	10э	11э	11э	13э	13э
			06.11.2019	06.11. 2019	06.11.2019	02.06.2020	06.11.2019	02.06.2020
рН	Единицы рН	6–9	7.3	7.3	7.3	7.3	6.5	7.4
Общая минерализация	мг/дм^3	1000	2550	2400	2850	2416	2300	1865
Жесткость общая	$^\circ\text{Ж}$	10	12	12.9	15.8	15.1	13.7	11.7
Хлориды	мг/дм^3	350	563	671	896	612	719	460
Сульфаты	»	500	557	647	753	558	691	333
Гидрокарбонаты	»	—	317	317	323	317	323	329
Кальций	»	—	140	132	169	150	147	121
Магний	»	50	69	74	89	93	78	70

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИППВ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Численное фильтрационное и миграционное моделирование выполнялось в программной среде Processing ModFlow 8 [15] для интерпретации опытно-экспериментальных работ и прогноза изменения минерализации подземных вод при реализации ИППВ. Анализ гидродинамической сетки, сформировавшейся на первой очереди Верхнешкульского водозабора [5], свидетельствует о том, что в качестве объекта моделирования может быть рассмотрена лента тока субширотного направления шириной 500 м протяженностью 6 км с эксплуатационной скважиной, расположенной в центре. На западной и восточной границах модели отметка уровня подземных вод составляет 75 м. Для более компактного представления модели ее размер по оси X может быть уменьшен до 500 м путем задания на 3 и В границы третьего рода (“General Head Boundary”) с параметрами границы (“GHB hydraulic conductance”) $0.2 \text{ м}^2/\text{сут}$. Шаг сетки — 2 м.

В качестве внутреннего граничного условия второго рода (“Well”) во всех задачах рассматривалась водозаборная скважина, работающая с постоянным дебитом $2000 \text{ м}^3/\text{сут}$, координаты скважины — 250 м, 250 м.

При решении нестационарных задач в блоки модели, соответствующие расположению инфильтрационного бассейна, задавалась величина инфильтрационного питания (“Recharge”), которая соответствует фактически полученному значению скорости фильтрации $2.5 \text{ м}/\text{сут}$ при проведении опытно-экспериментальных работ.

Стратификация модели

Основной продуктивный водоносный горизонт — ергенинский. Модельный разрез следующий:

первый пласт модели мощностью 20 м используется для моделирования движения инфильтрационных вод в зоне аэрации и при формировании купола растекания от инфильтрационного бассейна;

второй пласт модели мощностью 20 м — ергенинский водоносный горизонт, он используется для моделирования движения подземных вод в основном водоносном горизонте.

Структура потоков подземных вод в области исследования — плановая, о чем свидетельствует площадное распределение уровней подземных вод в ергенинском водоносном горизонте. Предполагается предпосылка горизонтального движения подземных вод в водоносном горизонте (втором пласте модели) и вертикального — в пределах первого пласта.

Фильтрационные и емкостные параметры участков ергенинского водоносного горизонта были приняты в соответствии с результатами, полученными при оценке запасов [5]. Коэффициент фильтрации первого модельного пласта в вертикальном направлении — $12 \text{ м}/\text{сут}$, в горизонтальном — $1 \text{ м}/\text{сут}$. Коэффициент фильтрации второго модельного пласта в вертикальном направлении — $1 \text{ м}/\text{сут}$, в горизонтальном — $12 \text{ м}/\text{сут}$. При решении миграционных задач гравитационная емкость пород (активная пористость) принималась равной 0.2.

Для калибровки фильтрационных параметров наиболее представительная ситуация — характеризующаяся (условно) стационарным режимом подземных вод при постоянной работе водозаборной скважины.

Результаты решения обратных задач в стационарной постановке свидетельствуют о соответствии модели условиям водоотбора и формирования депрессионной воронки: при постоянном дебите скважины уровень подземных вод во втором пласте модели находится в диапазоне от 44 до 55 м, что коррелирует с отметками, полученными в процессе проведения эксперимента (рис. 6).

Отдельного рассмотрения движения воды в зоне аэрации не требуется, поскольку гидрокупол формируется через 30 ч после начала инфильтрации из бассейна (при мощности зоны аэрации 20 м, коэффициенте фильтрации $3 \text{ м}/\text{сут}$ и гравитационной емкости 0.2).

В нестационарной постановке воспроизводились опытно-экспериментальные работы и имитация работы системы ИППВ. Решение задач в нестационарной постановке проводилось в следующей последовательности. Начальным условием задачи было модельное распределение уровней, полученное по результатам решения обратной задачи в стационарной постановке. Прогнозные временные промежутки разделялись на стресс-периоды, в течение которых внутренние граничные условия не изменяются. Вода ергенинского горизонта характеризуется минерализацией $2 \text{ г}/\text{дм}^3$, вода из инфильтрационного бассейна — $0.35 \text{ г}/\text{дм}^3$.

Воспроизведение опытно-экспериментальных работ

По результатам эксперимента фильтрационные параметры пластов были откорректированы: значение вертикального коэффициента фильтрации первого пласта уменьшено в 4 раза (до $3 \text{ м}/\text{сут}$); значение горизонтального коэффициента фильтрации второго пласта увеличено на $2 \text{ м}/\text{сут}$ (до $14 \text{ м}/\text{сут}$).

Модельные значения минерализации из-за особенностей проведения налива с перерывами имеют волнообразный характер (рис. 7).

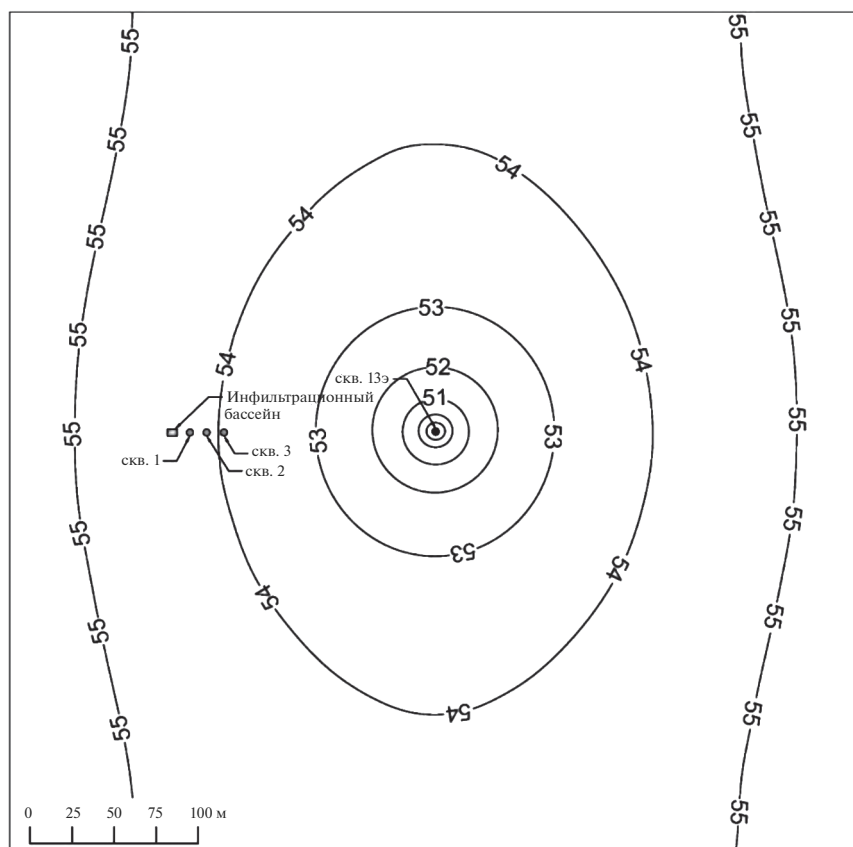


Рис. 6. Распределение уровней подземных вод (абс. отм.) во втором пласте по результатам решения обратной стационарной задачи. Шаг сетки 2 м.

Прогноз изменения минерализации при реализации системы ИППВ

Для оценки эффективности распреснения воды в водозаборной скважине с учетом периодов разной водности было выполнено решение прогнозных фильтрационных и миграционных задач в следующей постановке. В течение пяти лет инфильтрационный бассейн работает, 3 мес. из 12 в него поступает пресная вода. После пятилетнего периода нормальной водности имитируется один год низкой водности, т. е. система ИППВ не работает (отсутствие налива). Площадь бассейна 1000 м² обосновывается исходя из характерного размера участков выходов ергенинских песков на поверхность (25 м на 40 м).

На участке исследований при заданных фильтрационных и емкостных параметрах расход налива может составлять 2500 м³/сут. В наблюдательной точке, расположенной в блоке с водозаборной скважиной, подъем уровня в конце цикла составит ~4 м с последующим снижением на 3 м (рис. 8). Через 5 лет нормальной водности диапазон изменения абсолютных отметок уровня воды будет от 51 до 55 м. В течение шестого года (низ-

кая водность, налива нет) изменение абсолютных отметок уровня в течение года будет в диапазоне от 49 до 53 м. В следующий период нормальной водности и эксплуатации системы ИППВ диапазон изменения уровней будет аналогичен предшествующему.

Изменение минерализации воды в водозаборной скважине имеет более контрастный характер и показывает значительные флуктуации из-за цикличности налива (рис. 9). После завершения каждого цикла минерализация снижается до 1.1 г/дм³, через 9 мес. увеличивается почти до исходных значений, к пятому году — до 1.9 г/дм³. Отсутствие налива в маловодный год приводит к тому, что такая высокая минерализация сохранится в течение всего года. Среднемноголетнее значение минерализации составляет 1.56 г/дм³. Линза пресных вод в водоносном горизонте на участке “инфильтрационный бассейн — водозаборная скважина” не будет окончательно сформирована, поскольку при продолжении циклического пролива будет наблюдаться ее сработка в течение года (рис. 10).

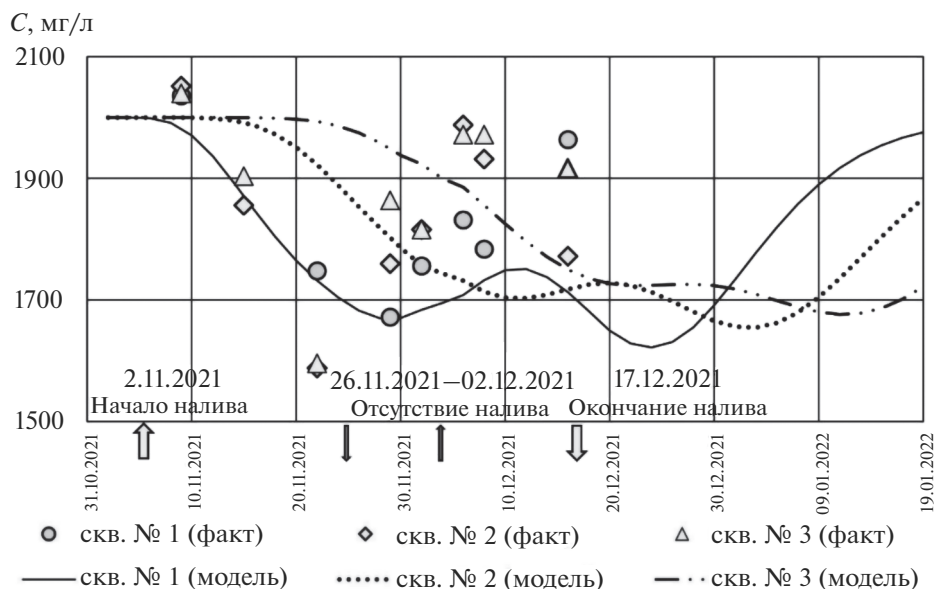


Рис. 7. Изменение минерализации подземных вод в ергенинском водосном горизонте по данным фактических изменений и по результатам моделирования.

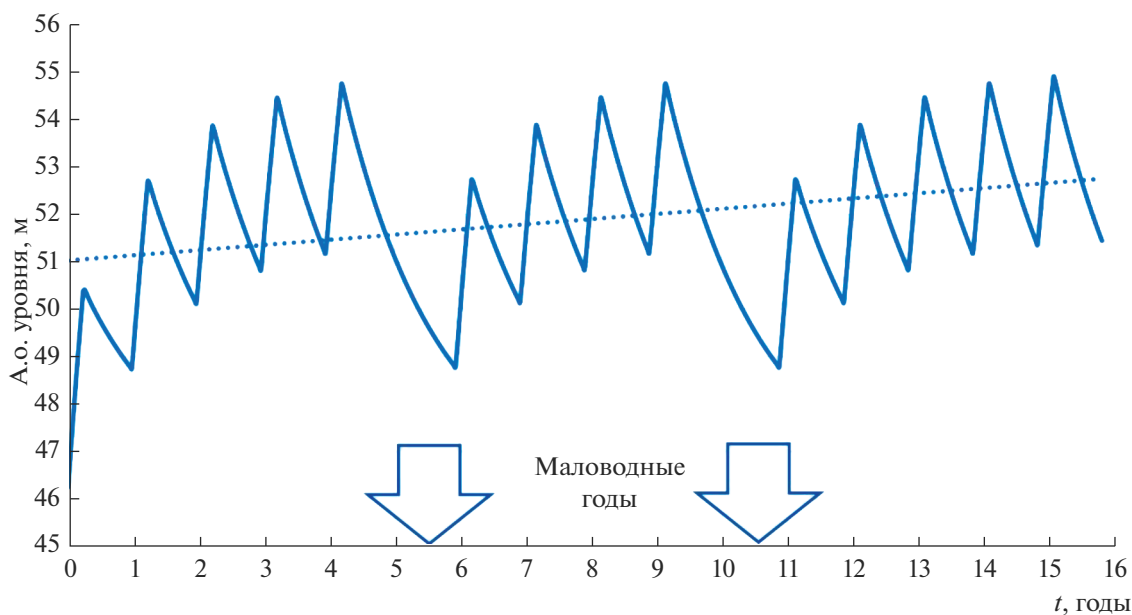


Рис. 8. Прогнозное изменение уровня подземных вод в водозаборной скважине.

ВЫВОДЫ

Наиболее эффективно функционируют инфильтрационные бассейны, которые характеризуются хорошей связью с водоносным горизонтом (имеются выходы на поверхность линз ергенинских песков) и находятся в непосредственной близости от эксплуатационных скважин. Инфильтрационный бассейн размером 25 м × 40 м, расположенный на расстоянии 150 м от водозабор-

ной скважины (расход водоотбора 2 тыс. м³/сут), при благоприятных условиях (отсутствие кольматации дна бассейна) позволяет пополнять запасы воды в среднегодовом разрезе на 30%. При этом диапазон изменения минерализации в течение года будет от 1.9 до 1.1 г/дм³. Среднегодовое значение минерализации воды в эксплуатационной скважине составит 1.53 г/дм³. Создание постоянной линзы пресных вод в водоносном горизонте на участке «инфильтрационный бассейн –

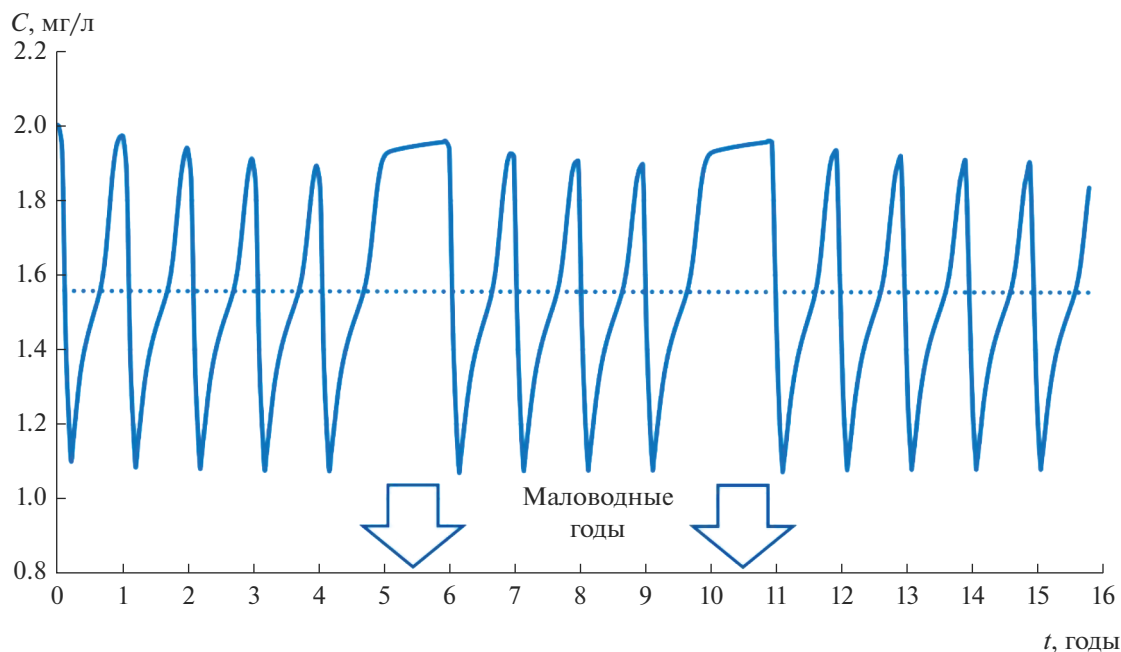


Рис. 9. Прогнозное изменение минерализации подземных вод в водозаборной скважине.

водозаборная скважина” невозможно из-за ее ежегодной работки.

Для первой очереди Верхнеяшкульского водозабора с производительностью 15 тыс. м³/сут для поддержания среднегодового значения минерализации на уровне 1.0 г/дм³ необходимый объем подачи воды в систему ИППВ должен быть ≥ 8.4 млн м³/год. Рассчитанные объемы стока половодья нормальной водности составляют 6.69 млн м³, что на 25% меньше необходимых для реализации ИППВ.

По данным исследований в 1987–1992 гг., объем паводкового стока в створе р. Яшкуль варьировал от 1.9 млн м³ в 1989 г. до 7.29 млн м³ в 1988 г., в среднем за 6 лет это 4.3 млн м³ (почти в 2 раза меньше необходимого). Объем паводкового стока в 2020–2021 гг. за три этапа половодья (в общей сложности в течение 13 дней) составил 0.5 млн м³, что почти на порядок меньше, чем за период 1987–1992 гг., и в 20 раз меньше, чем нужно для организации ИППВ.

Реализация ИППВ на первой очереди Верхнеяшкульского водозабора нецелесообразна, поскольку даже в годы нормальной водности поверхностного стока будет недостаточно для распреснения подземных вод до требуемых показателей.

Для решения в краткосрочной перспективе вопросов увеличения объемов подачи подземных вод в г. Элисту и улучшения ее качества рекомендуется:

выполнить ремонт водовода для предотвращения потерь воды;

возобновить эксплуатацию Баяртинского месторождения подземных вод, минерализация воды в котором 1.1–1.2 г/дм³;

внедрить современные методы водоподготовки.

Если руководство Республики Калмыкии в перспективе примет решение о необходимости реализации ИППВ на Троицком месторождении подземных вод, то перед началом полномасштабных работ в течение трех лет рекомендуется:

- 1) в разные фазы водного режима провести отбор проб для определения качества паводковых вод, включая содержание взвешенных веществ;
- 2) разработать регламент водоподготовки;
- 3) организовать постоянные гидрологические посты в створе плотин, которые намечается построить;
- 4) провести совместные измерения на действующих гидропостах на реках Амта-Бургуста и Аксай Есауловский и обосновать возможность их использования в качестве аналогов;
- 5) выполнить поисковые работы для картирования линз ергенинских песков;
- 6) провести опытно-экспериментальные работы (наливы) по оценке фильтрационных свойств каждой из линз;
- 7) провести опытно-промышленную эксплуатацию участка ИППВ для оценки степени кольматации и установления продолжительности фильтроцикла;

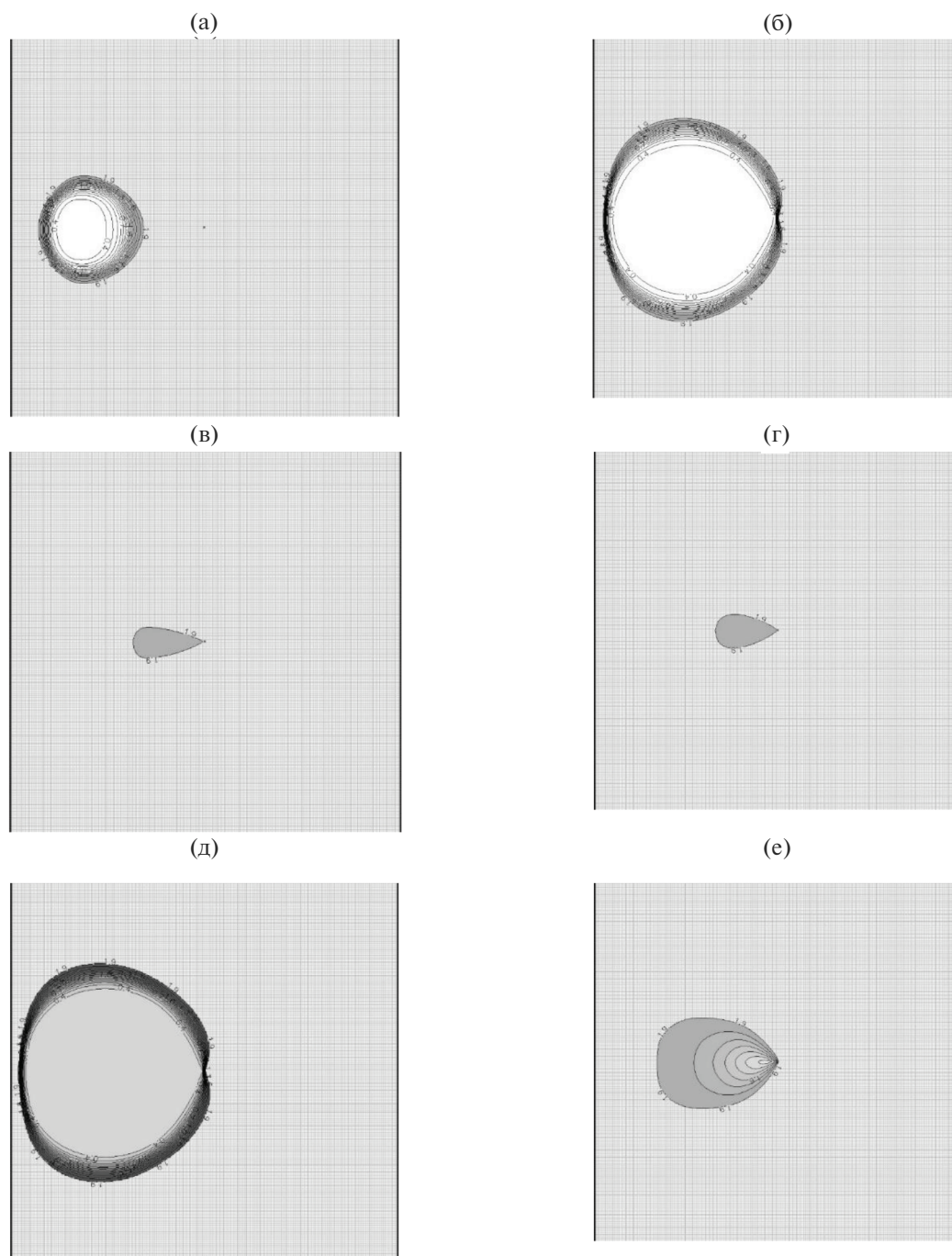


Рис. 10. Положение линзы распресненных вод на следующие моменты времени от начала эксплуатации инфильтрационного бассейна системы ИППВ: а – 20 сут (начало пролива), б – 90 сут (конец пролива), в – 365 сут (конец 1 года), г – 2165 сут (конец 6-го года, 1-й год без ИППВ), д – 5550 сут (15-й год, после ИППВ), е – 5770 сут (конец 15-го года).

8) выполнить работы по оценке запасов подземных вод в связи с изменившейся схемой эксплуатации.

Решение о возможности и целесообразности эксплуатации системы ИППВ должен принимать орган управления фондом недр при согласовании

с главным государственным санитарным врачом по Республике Калмыкии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В.С., Боголюбов К.С., Никольская Е.А. Отечественный и зарубежный опыт искусственного

- пополнения подземных вод. Итоги науки и техники. Гидрогеология и инженерная геология. Т. 3. М.: ВИНТИ, 1974. 148 с.
2. *Глотов В.Е., Глотова Л.П.* Особенности применения методов магазинирования пресных подземных вод в бассейне реки Колыма // Изв. Самарского НЦ РАН. 2012. Т. 14. № 1–9. С. 2316–2320.
 3. *Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Бугров А.А., Григорьев В.Ю., Киреева М.Б., Рец Е.П., Сафронова Т.И., Телегина А.А., Телегина Е.А.* Оценка возобновляемых водных ресурсов Европейской части России и пространственно-временной анализ их распределения // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 4. С. 18–31. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2016-4-2>
 4. Доклад об экологической ситуации на территории Республики Калмыкия в 2019 году. Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Калмыкия. Элиста: Правительство Республики Калмыкии, 2019. 89 с.
 5. *Ершов Г.Е.* Анализ условий формирования и эксплуатации пресных подземных вод Троицкого месторождения (г. Элиста) // Разведка и охрана недр. 2014. № 5. С. 25–36.
 6. *Зекцер И.С.* Подземные воды Мира: ресурсы, использование, прогнозы. М.: Наука, 2007. 438 с.
 7. *Зекцер И.С., Потапова Е.Ю., Четверикова А.В., Штенгелов Р.С.* Перспективы искусственного восполнения подземных вод на юге европейской территории России // Вод. ресурсы. 2012. Т. 39. № 6. С. 624–638.
 8. Информационный бюллетень о состоянии недр Южного федерального округа Российской Федерации за 2019 г. Вып. 15. Ессентуки, 2019. 183 с.
 9. *Кадаева А.Г.* К вопросу о качестве оросительных вод в Калмыкии // Вест. Калмыцкого ин-та гуманитарных исследований РАН. 2013. № 1. С. 160–160.
 10. Обводнение Республики Калмыкия — одна из главных задач настоящего времени. Новости от 04.02.2020 г. ФНЦ агроэкологии РАН. [Электронный ресурс]. <https://vfanc.ru/news/fnts-agroekologii-ran/obvodnenie-respubliki-kalmykiya-odna-iz-glavnykh-zadach-nastoyashchego-vremeni/php>. (дата обращения: 28.10.2020)
 11. *Плотников Н.А.* Проектирование систем искусственного восполнения подземных вод для водоснабжения. М.: Стройиздат, 1983. 230 с.
 12. Президиум Правительства Калмыкии утвердил планы по водо- и газоснабжению республики. Коммерсант. 22.11.2016. <https://www.kommersant.ru/doc/3162830>
 13. ФГБУ "Гидроспецгеология" приняло участие в выездном расширенном совещании в целях подготовки индивидуальной программы социально-экономического развития Республики Калмыкия. 16.08.2019. https://www.specgeo.ru/news/archive/?ELEMENT_ID=450
 14. *Халимов Д.П.* Международный опыт использования искусственного пополнения запасов подземных вод // Вест. КРСУ. 2016. Т. 16. № 9. С. 142–146.
 15. *Anderson Mary P., Woessner William W., Hunt Randall J.* Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport // Academic Press. Elsevier Inc. 2015. 564 p.
 16. *Rybnikova L.S., Frolova N.L., Morozov M.G., Komin A.V., Rybnikov P.A.* Assessment of the Republic of Kalmykia artificial groundwater resources recharge at the expense of the surface runoff accumulation // Improving Energy Efficiency, Environmental Safety and Sustainable Development in Agriculture. Int. Sci. Practical Conf. Saratov, 2022. С. 177–189.