

УДК 556.3

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ XXI В. НА БАЛАНС ПОДЗЕМНЫХ ВОД ЮГО-ЗАПАДНОГО КРЫМА¹

©2024 г. В. Н. Самарцев^а, И. А. Чиганов^{а, *}, С. О. Гриневский^а, С. П. Поздняков^а,
Я. В. Сорокоумова^а, В. А. Бакшевская^б

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

^бИнститут водных проблем РАН, Ивановская научно-исследовательская станция, Конаково Тверской обл., 171251 Россия

*e-mail: ilya-chiganov@mail.ru

Поступила в редакцию 17.04.2024 г.

После доработки 20.05.2024 г.

Принята к публикации 21.05.2024 г.

Разработана и откалибрована на современный период региональная геофильтрационная модель юго-западного Крыма в пределах Альминского артезианского бассейна и прилегающей к нему области трещинно-карстовых подземных вод Горного Крыма. На основе численных экспериментов с этой моделью оценены изменения ресурсов подземных вод под влиянием ожидаемых в XXI в. климатических изменений. Для этого для выбранного района исследования построены прогнозные карты инфильтрационного питания. Прогнозные карты инфильтрационного питания строились для равнинной части исследуемой области с помощью моделирования инфильтрационного водообмена. Для горной части в прогнозе изменения питания учитывались не только инфильтрационный водообмен, но и инфлюация – поглощение осадков поверхностными формами карста. В качестве прогнозного использован экстремальный сценарий изменения климата SSP5-8.5, предусматривающий максимальное потепление и ансамбль моделей общей циркуляции атмосферы и океана семейства CMPI 5. Из ансамблевого прогноза выбраны три наиболее контрастные по изменению индекса увлажненности модели, и для них получены прогнозные карты изменения питания в XXI в., использованные затем в численных экспериментах. Прогнозное инфильтрационное питание заметно отличается от современной величины – 366.4 тыс. м³/сут: при “сухом” климате инфильтрационное питание составляет 187.9 тыс., при “среднем” – 283.6 тыс., при “влажном” – 403.3 тыс. м³/сут. Результаты прогнозного моделирования баланса подземных вод в течение XXI в. при использовании этих карт инфильтрационного питания показали высокую адаптационную роль емкостных запасов и сокращения минимального речного стока на исследуемом масштабе времени порядка ста лет при сохранении сложившегося водоотбора подземных вод.

Ключевые слова: геофильтрационная модель, калибровка, баланс подземных вод, изменение климата, карта инфильтрационного питания, даунскейлинг, прогноз.

DOI: 10.31857/S0321059624060079 EDN: VOYXJV

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемые в последние десятилетия климатические трансформации в той или иной степени отражаются как на общей структуре водного баланса суши, так и на его отдельных компонентах, в том числе на речном и подземном стоке [1, 9]. Фундаментальная научная задача современных исследований – переход от фиксации глобальных климатических изменений к оценке масштабов их проявления на региональном уровне [13] и выполнению прогнозных оценок на основе сценарного подхода [17].

Такие прогнозные оценки следует проводить для адаптации к климатическим изменениям устойчивого использования подземных вод, питание которых осуществляется в основном за счет инфильтрации атмосферных осадков [15].

В настоящее время сложившийся научно-обоснованный подход – использование сценарного подхода к прогнозу изменения климата. Суть этого подхода состоит в том, что для выбранного сценария выброса парниковых газов используется ансамбль прогнозных моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), позволяющий спрогнозировать осадки и температуру на заданный период времени для всей поверхности Земли. Далее результаты даунскейлинга

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема FMWZ-2021-0001, номер государственной регистрации 121040700170-9).

этих прогнозов могут быть применены в гидрологических и гидрогеологических моделях для прогноза изменения баланса поверхностных и подземных вод конкретных регионов.

Инфильтрационное питание – основная приходная часть баланса подземных вод. Процессы трансформации атмосферных осадков на поверхности земли и в почве, определяющие среднюю величину и динамику инфильтрационного питания, напрямую зависят от климатических условий в данный период времени. Поэтому изменение климатических условий может привести к изменению питания подземных вод и, как следствие, – к изменению их естественных ресурсов [14, 15]. Эта проблема весьма актуальна для Крымского п-ова, являющегося в гидрогеологическом отношении балансово-замкнутым регионом, в котором все ресурсы поверхностных и подземных вод формируются за счет осадков. Особенности геологического строения, высотная зональность и связанная с ней изменчивость коэффициента увлажнения, а также различные ландшафтные условия обуславливают существенную площадную изменчивость питания подземных вод полуострова. По существующим оценкам, интенсивность питания меняется от 200–500 мм/год в Горном Крыму [5, 6] до практически нулевых значений в северной части равнинного Крыма [11].

Цель настоящей работы – оценка возможных изменений ресурсов подземных вод юго-западного Крыма в течение XXI в. при реализации неблагоприятного сценария климатических изменений.

Для достижения указанной цели разработана геофильтрационная модель юго-западной части Крымского п-ова, отражающая плановую изменчивость питания подземных вод, их взаимосвязи с поверхностными водами и сложившийся к настоящему времени эксплуатационный водоотбор. С использованием экстремальных прогнозных климатических сценариев выполнены оценки изменения питания подземных вод на исследуемой территории в течение XXI в. Далее эти оценки инкорпорированы в разработанную геофильтрационную модель, на которой выполнены численные эксперименты по изучению

климатических преобразований динамики режима и баланса подземных вод.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Гидрогеологические условия Крымского п-ова и его юго-западной части изучены достаточно хорошо. Так, с начала второй половины 1940-х до второй половины 1960-х гг. на всей территории Крыма проводились комплексные геологические и гидрогеологические съемки, результатом которых стала карта основных водоносных горизонтов масштаба 1 : 750 000 (1963 г.) по листам L-(36), (37) [7]. С 1965-х до начала 1990-х гг. выполнялись работы по построению гидрогеологических карт масштаба 1 : 200 000.

С 2000 по 2006 г. была проведена оценка прогнозных ресурсов и эксплуатационных запасов подземных вод с построением гидрогеологических карт основных водоносных горизонтов.

После 2014 г. увеличился водоотбор из подземных вод, в связи с чем в период с 2016 по 2020 г. предприятием “Крымгеология” были выполнены работы по оценке современного состояния месторождений питьевых и технических подземных вод нераспределенного фонда недр с целью приведения их запасов в соответствие с действующим законодательством на территории Республики Крым.

В 2018 г. были проведены работы по созданию гидрогеологических карт, авторских вариантов комплектов гидрогеологических карт масштаба 1 : 1 000 000 листов P-35, N-42, M-44, I-36 с клапаном L-37, P-39 и комплекта предварительных гидрогеологических карт масштаба 1 : 1 000 000 к листу Q-39.

С 2021 г. проводилось геологическое изучение недр в целях выявления новых месторождений питьевых подземных вод, в результате было увеличено количество эксплуатационных запасов на крупных водозаборных сооружениях, которые в основном расположены в юго-западной части Крымского п-ова. Также выполнялись работы по оценке ресурсного потенциала подземных вод

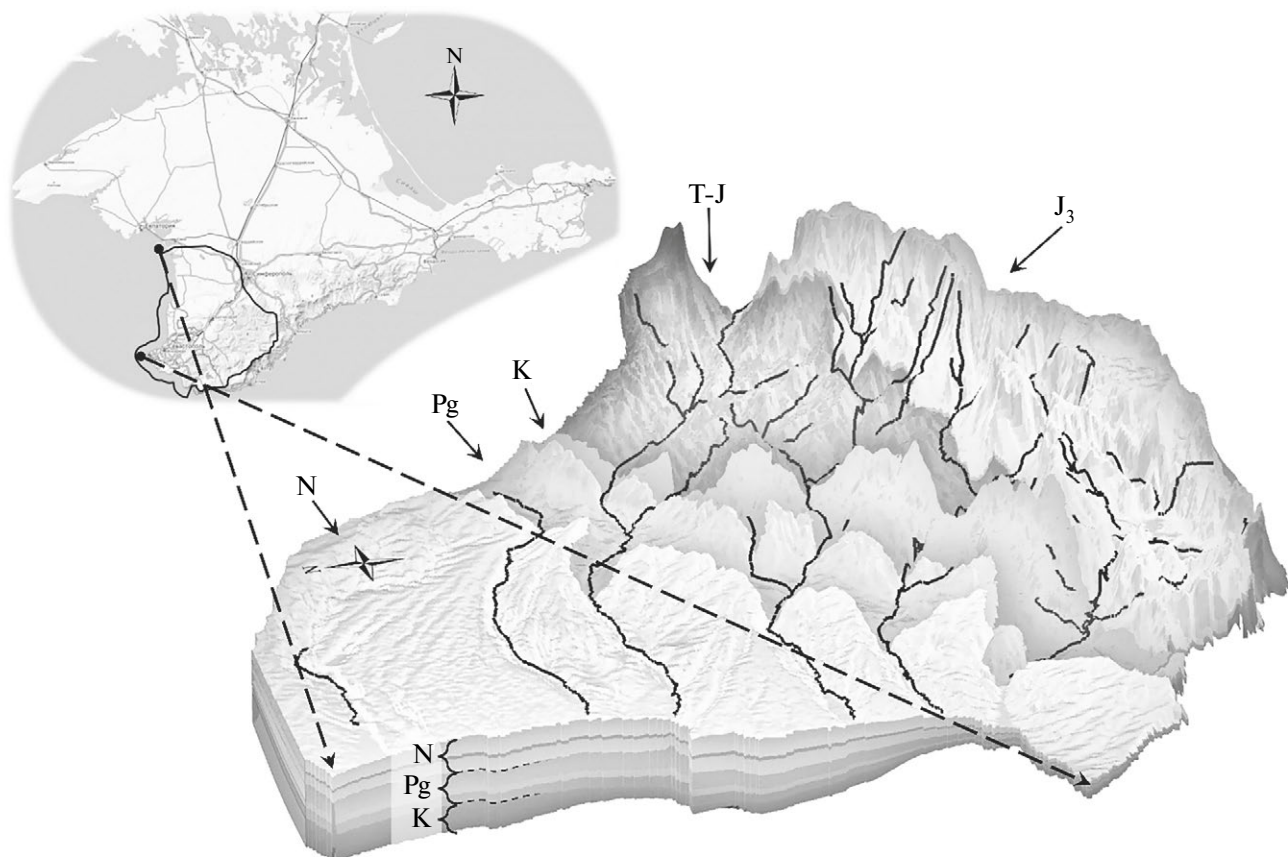


Рис. 1. Картограмма территории расположения и геологического строения изучаемой территории.

территории и обеспеченности населения ресурсами подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения, разработки рекомендаций по рациональному использованию ресурсной базы питьевых и технических подземных вод.

Район исследований расположен в юго-западной части Крымского п-ова и включает в себя Альминскую впадину и прилегающую область Горного Крыма (рис. 1).

На этой территории расположены бассейны рек северо-западного склона Крымских гор: Черной, Бельбека, Качи, Альмы и Западного Булганака. В гидрогеологическом отношении рассматриваемая территория относится к Альминскому артезианскому бассейну (ААБ) и Крымской сложной гидрогеологической складчатой области (СГСО) [7], в которой формируется поверхностный сток упомянутых рек и инфильтрационное питание трещинно-карстовых подземных вод. В целом, эту территорию можно рассматривать как балансово-замкнутый бассейн стока поверх-

ностных и подземных вод — от водораздела, расположенного на Главной гряде Крымских гор, на юго-востоке до Черного моря на юго-западе и западе репрезентативного бассейна (рис. 1). Поток подземных вод, сформированный в пределах Главной гряды, движется по основному направлению главных рек в сторону Черного моря, частично разгружаясь в речную сеть [4, 10].

По условиям формирования подземных вод в исследуемом районе можно выделить следующие зоны в направлении от СГСО через ААБ к морю:

- область питания и формирования потока трещинно-карстовых подземных вод;
- область частичной разгрузки подземных вод в виде многочисленных родников;
- область преимущественно транзита подруслового потока подземных вод;
- область транзитного потока и частичной разгрузки в речную сеть в пластовой системе ААБ;
- область субмаринной разгрузки.

Область питания и формирования потока трещинно-карстовых подземных вод приурочена к Главной гряде Крымских гор, характеризующейся большим количеством осадков и малым испарением [6]. Питание подземных вод происходит за счет рассредоточенной инфильтрации и сосредоточенной инфильтрации через поверхностные карстовые формы. Область формирования родникового стока приурочена к контакту верхнеюрских пород с отложениями среднеюрского возраста или с отложениями таврической серии. Вторая и третья гряды Крымских гор, сложенные терригенно-карбонатными породами неогенового, палеогенового и мелового возраста [7], формируют систему межпластовых водоносных горизонтов ААБ.

Помимо разгрузки подземных вод в гидросеть, для Крымского п-ова в целом и для ААБ в частности важная часть расходных статей баланса – субмаринная разгрузка [12]. Эксплуатация подземных вод централизованными и децентрализованными водозаборами вблизи морского побережья приводит к перехвату естественной разгрузки подземных вод и привлечению речного стока на отдельных эксплуатируемых месторождениях [3], а также к развитию интрузии морских вод.

Для построения карты инфильтрационного питания на современный период рассматриваемая территория была разделена по типу рельефа на высокогорную и равнинную (предгорную) области по изолинии 400 м, которая достаточно хорошо коррелирует с границей распространения юрских известняков и пород таврической серии – со слоистой относительно полого залегающей толщей меловых в горной части и более молодых отложений в равнинной (рис. 1).

Для предгорной и равнинной частей территории применима схема “диффузионной”, относительно равномерной на элементарной площади инфильтрации. Для этой части исследуемой территории использовалась методика оценки питания подземных вод на основе геогидрологического моделирования [2]. Для построения карты питания проведено районирование территории по комплексу метеорологических (климатических), ландшафтных и гидрогеологических

факторов, в совокупности определяющих неоднородность условий формирования питания с выделением элементарных площадей $>0.2 \text{ км}^2$. В результате этого районирования выделено 225 сочетаний ландшафтных условий, для которых проведено моделирование формирования инфильтрационного питания подземных вод. По результатам этого моделирования построена карта среднемноголетнего инфильтрационного питания предгорной и равнинной частей территории, отвечающая современным климатическим условиям [11].

В высокогорной части территории формирование инфильтрационного питания имеет локально-инфилюационный характер в связи с интенсивным развитием поверхностного карста в юрских известняках, неравномерной трещиноватостью пород таврической серии и сильной расчлененностью рельефа, что определяет невозможность использования геогидрологического моделирования для оценки инфильтрации. Для оценки питания в этой части выделены площади плато и склонов. Затем с использованием высококоразрешимой базы данных “Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration” [21] на основе водно-энергетического подхода М.И. Будыко было рассчитано, что в области горных склонов и плато балансово-допустимые величины суммарного стока меняются в среднем от 100 до 500 мм/год. Эти величины согласуются, в целом, с характеристиками стока верховьев рек, протекающих на исследуемой территории [4], и с результатами экспериментальных водно-балансовых исследований на закарстованных плато Ай-Петринской яйлы [6] и геофильтрационного моделирования подземных вод юго-западной части Горного Крыма [12]. Начальные величины инфильтрационного питания для склонов приняты в диапазоне 30–70, для плато – 150–500 мм/год. Затем инфильтрационное питание в этих зонах уточнялось в ходе калибровки модели. Ай-Петринский массив – основная область питания трещинно-карстовых подземных вод юго-западной части Горного Крыма. По результатам индикаторных экспериментов, существенный поток трещинно-карстовых подземных вод направлен к северо-западу к Байдарской котловине, на контуре которой он частично разгружается через Скульский источник (один из крупнейших

источников Крымского п-ова и крупнейший карстовый источник Ай-Петринского массива) и в подрусловые отложения р. Черной (с. Родниковское), а другая часть потока разгружается в Черное море в районе мысов Форос и Айя и в Балаклавской бухте [8]. Таким образом, Скельский источник – центр частичной разгрузки трещинно-карстовых подземных вод в изучаемом районе, поэтому его можно считать репрезентативным для юго-западной части Горного Крыма и данные по его расходам можно использовать для характеристики подземного стока и для калибровки модели. В результате построена карта современного среднесуточного питания для всей исследуемой территории. Суммарная величина инфильтрационного питания, полученная на ее основе, составила 264.2 тыс. м³/сут с допустимым интервалом варьирования от 174.5 до 349.8 тыс. м³/сут.

РАЗРАБОТКА И КАЛИБРОВКА ГЕОФИЛЬТРАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Для исследуемого бассейна стока в интерфейсе ModelMuse [20] для программы Modflow 6 [16] разработана численная геофильтрационная модель, описывающая среднесуточное состояние подземных вод и среднемеженное состояние поверхностных водотоков. Модель имеет планово-пространственную структуру и включает в себя десять расчетных слоев, соответствующих основным водоносным горизонтам и комплексам (табл. 1). Непроницаемые плановые границы модели заданы по линиям поверхностных водоразделов (рис. 1), и эти границы, в целом, со-

впадают с принятыми границами артезианских бассейнов Крыма [7]. В область моделирования включена пятикилометровая зона потенциальной субмаринной разгрузки вдоль побережья Черного моря. Взаимодействие подземных вод с морем задано в первом модельном слое граничным условием 3-го рода с помощью модуля GHB (“General Head Boundary”) [16]. В модели учтены выклинивание и ограниченное распространение выделенных горизонтов, за счет чего на разных участках дна моря выходят отложения разного возраста – от неогеновых до юрских. В соответствии с этим море как граничное условие потока подземных вод задано в самый верхний активный расчетный слой (от 1 до 10) в каждом узле численной сетки.

Внутреннее граничное условие (сток), характеризующее современную эксплуатацию подземных вод, реализовано на модели в виде 214 действующих водозаборов, дебит которых задан по фактическому среднегодовому водоотбору за 2020 г., в сумме составившему 127.7 тыс. м³/сут.

Поскольку моделируется ограниченная область с большим количеством водозаборов, есть возможность выделить естественные границы потока. Северная граница области моделирования проходит приблизительно от Евпатории до Симферополя. Один из крупных водозаборов (Ивановский-1 с водоотбором >30 000 м³/сут) расположен очень близко к границе расчетной области. Расширение расчетной области было признано нецелесообразным, поскольку повлекло бы за собой включение других водозаборов

Таблица 1. Вертикальная дискретизация модели (в.г. – водоносный горизонт)

Номер слоя	Название горизонта	Проводимость или коэффициент фильтрации
-	Аллювиальные отложения аQ	5 м/сут
1	Серравальско-мессинский в.г. ($N_{1,sv}$ -mes)	200 м ² /сут
2	Серравальский водоупорный горизонт ($N_{1,sv}$)	0.0001 м/сут
3	Бурдигальско-серравальский водоупорный ($N_{1,bur-srv}$)	100 м ² /сут
4	Бартон-бурдигальский водоупорный ($P_2b - N_{1,bur}$)	0.0001 м/сут
5	Лютетско-бартоновский в.г. (P_2l-b)	100 м ² /сут
6	Танет-ипрский водоупорный ($P_1t - P_2j$)	0.001 м ² /сут
7	Сеноман-зеландский в.г. ($K_2s - P_1sl$)	100 м ² /сут
8	Апт-альбский водоупорный (K_1a-al)	0.001 м/сут
9	Валанжин-барремский в.г. (K_1v-br) и верхнеюрский в.г. (J_3)	100 м ² /сут
10	Мезозойская зона экзогенной трещиноватости MZ	1 м/сут

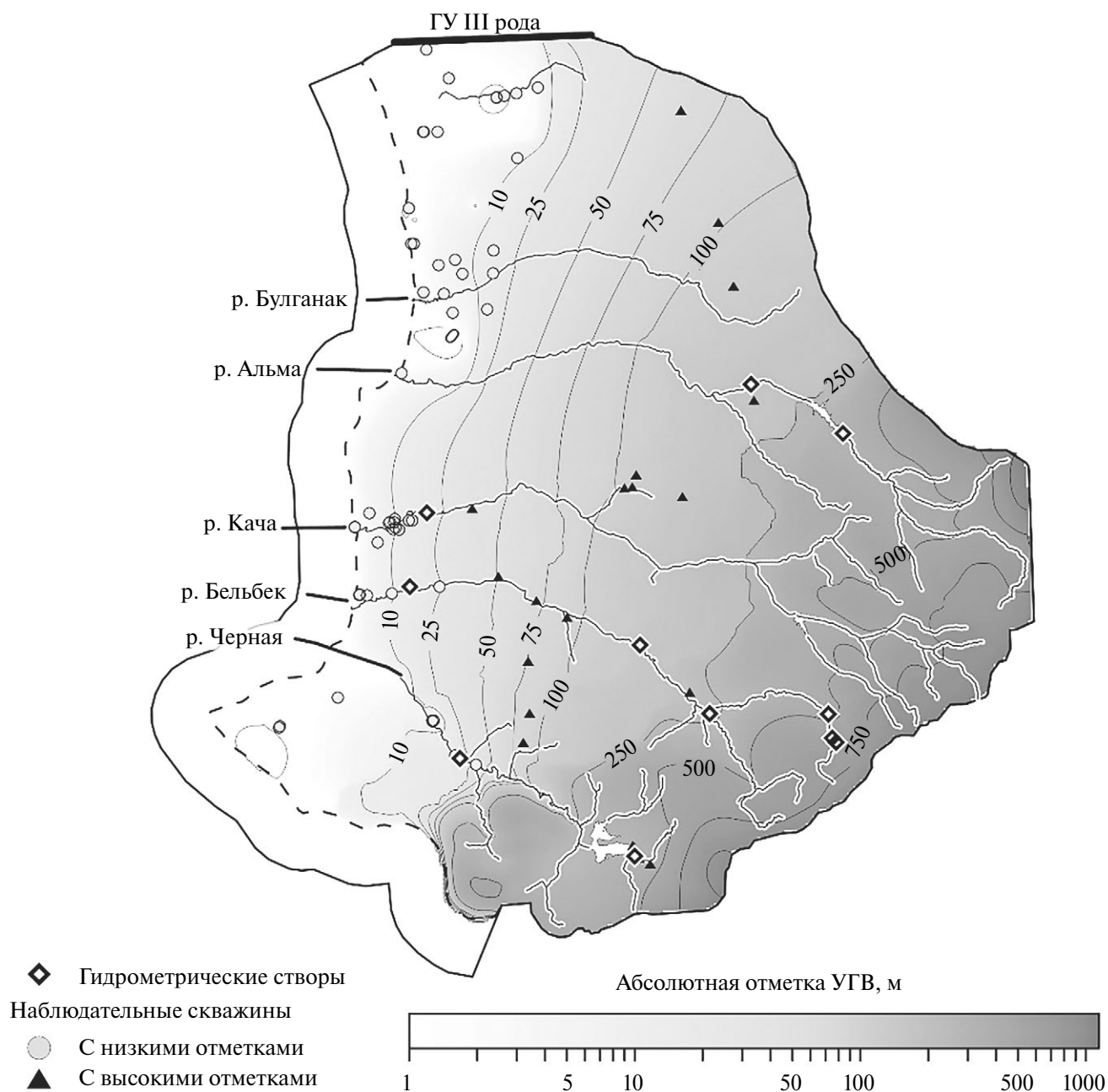


Рис. 2. Расположение точек наблюдения.

с возникновением аналогичных проблем. Для моделирования фактического притока с севера из-за пределов моделируемой области вдоль северной границы задана граница III рода (рис. 2) с помощью модуля ГНВ. Уровни на этой границе заданы равными естественным, сопротивление подбиралось при калибровке.

Инфильтрационное питание задается в каждом плановом узле численной сетки на суше

в верхний активный слой модели с помощью модуля RCH (“Recharge”). Для учета взаимосвязи подземных вод с реками речная сеть моделируется с помощью модуля SFR (“Stream Flow Routing”) [17]. Этот модуль позволяет рассчитывать изменение расхода воды и связанное с этим изменение уровня воды в русле вплоть до полного пересыхания реки в зависимости от ее подземного питания. В пределах области моделирования выделено 5 бассейнов стока – это

бассейны рек Черной, Бельбек, Качи и Альмы, а пятый бассейн стока – северный, в его пределах находятся существовавшие ранее реки (Булганак и Тобе-Чокрак), которые к настоящему моменту не имеют постоянного круглогодичного стока. Эти 5 крупных бассейнов разделены, в общей сложности, на 68 малых бассейнов. В пределах каждого малого бассейна выделен соответствующий сегмент речной сети, связанный с другими сегментами выше и ниже по течению, применяемый модуль SFR обеспечивает передачу воды между сегментами с учетом направления потока и заданных при разработке модели связей.

Для моделирования использована неструктурированная сетка с базовой дискретизацией 400×400 м со сгущением методом дерева квадратов в долинах рек. Для учета родниковой разгрузки при региональном характере модели вместо указания родников как фиксированных точек разгрузки в верхнем активном слое всей

модели задано граничное условия типа дрены с помощью модуля “Drain” [16] с отметкой дренирования, равной отметке рельефа. Дрена задана в самые верхние активные ячейки по всей модельной сетке, что позволяет моделировать формирование родниковой разгрузки на участках локального превышения уровня подземных вод над уровнем земли. Для соблюдения общего водного баланса без потерь этой родниковой разгрузки используется модуль “Water Mover” [16], который позволяет моделировать передачу определенного расхода воды от одного граничного условия к другому. Для этого вся модель разделена на отдельные малые водосборные бассейны по поверхностным водоразделам, и суммарный расход родниковой разгрузки в границах водосбора передается в соответствующий сегмент речной сети. Таким образом, родниковая разгрузка остается в общем водном балансе моделируемого бассейна стока.

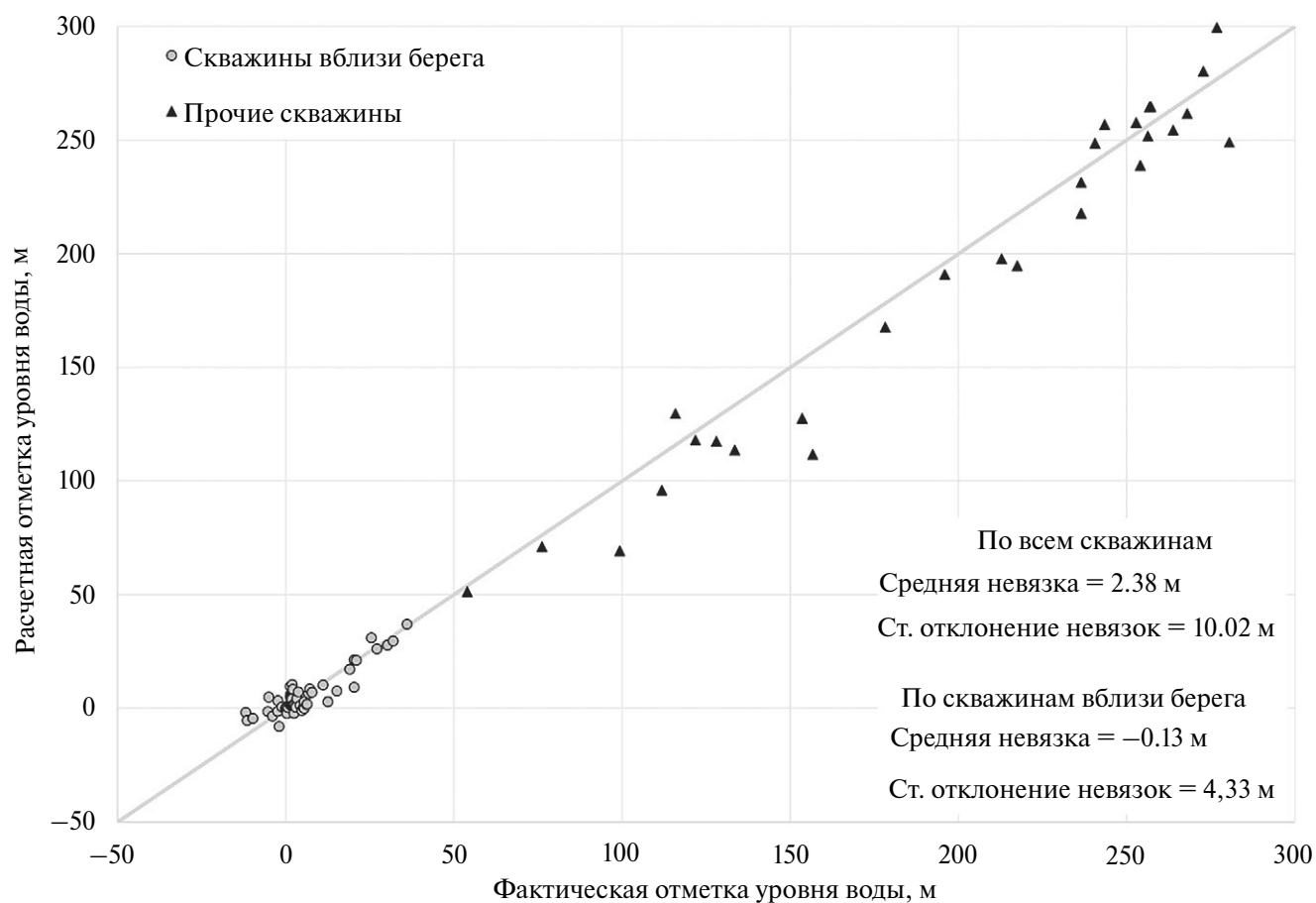


Рис. 3. Сопоставление расчетных и фактических уровней подземных вод.

Для калибровки модели выбраны следующие параметры:

- проводимость серравальско-мессинского водоносного горизонта (первый слой);
- проводимости других водоносных горизонтов на участках их выхода на поверхность;
- инфильтрационное питание, разделенное на зоны; в каждом из пяти крупных речных бассейнов калибруется отдельно питание на плато и отдельно – питание на склонах; инфильтрационное питание в равнинной части рассматриваемой территории не калибруется, поскольку принимается достаточно обоснованным в ходе геогидрологического моделирования.

В процессе калибровки модели использовались два типа данных – результаты режимных наблюдений за уровнями подземных вод по 82 скважинам и режимные наблюдения за расходами рек по 11 гидрометрическим створам, расположение которых показано на рис. 2.

Результаты калибровки модели по уровням подземных вод показаны на рис. 3. Из рис. 3 следует, что невязки модельных и фактических напоров по скважинам можно разделить на две группы. К первой группе невязок относятся скважины, расположенные в равнинной части, которые вскрывают преимущественно серравальско-мессинский горизонт (1 слой). Абсолютные отметки в них находятся в пределах 20 м над уровнем моря. Для этой группы скважин средняя невязка составляет -0.2 м, стандартное отклонение – 4.33 м. Вторую группу невязок

образуют наблюдательные скважины, расположенные в горной части. Для горной части характерны большие значения напорного градиента, невязки между фактическими и расчетными уровнями существенно больше. Средняя невязка составляет $+6.05$ м, стандартное отклонение – 15.2 м.

Сопоставление модельных и фактических среднемеженных расходов рек после калибровки модели показывает, что невязка расходов по 8 из 11 контрольных створов $\leq 25\%$ (табл. 2) и может считаться удовлетворительной с учетом надежности величин ненарушенного меженного стока.

В ходе калибровки был увеличен суммарный расход инфильтрационного питания до 324.6 тыс. м³/сут, что приближено к его верхнему пределу – 349.8 тыс. м³/сут, полученному при построении карты питания. Уточненная в процессе калибровки геофильтрационной модели карта инфильтрационного питания подземных вод для исследуемого бассейна стока показана на рис. 4, и по ней видно, что максимальное увеличение расхода инфильтрационного питания на 42 тыс. м³/сут приурочено к бассейну р. Черной. При этом в наиболее высокогорной закарстованной части бассейна расчетная величина питания достигла 250 мм в год. Эта величина питания не выходит за рамки полученных ранее оценок [6] и оценок с использованием водно-энергетического подхода М.М. Будыко. Кроме того, увеличение питания в этой области, возможно, отражает то, что подземный водосборный бассейн

Таблица 2. Сравнение фактических и расчетных среднемеженных расходов рек

Расположение створа	Расход, м ³ /сут		Невязка, %
	Фактический	Модельный	
р. Кача – с. Суворово	37 900	36 700	-3
р. Бельбек – с. Куйбышево	40 900	47 700	14
р. Бельбек – с. Фруктовое	44 800	43 600	-3
р. Биюк-Узенбаш – с. Счастливое	7 200	9 300	23
р. Кучук-Узенбаш – с. Многогорчье	4 700	4 100	-15
Приток р. Кучук-Узенбаш – с. Многогорчье	8 200	10 900	25
р. Коккозка – с. Аромат	16 000	13 600	-18
р. Черная, с. Хмельницкое	113 200	76 600	-48
р. Черная – с. Родниковое	34 800	40 050	13
р. Альма – пгт Почтовое	15 900	22 150	28
р. Альма – выше Партизанского вдхр	26 000	33 300	22

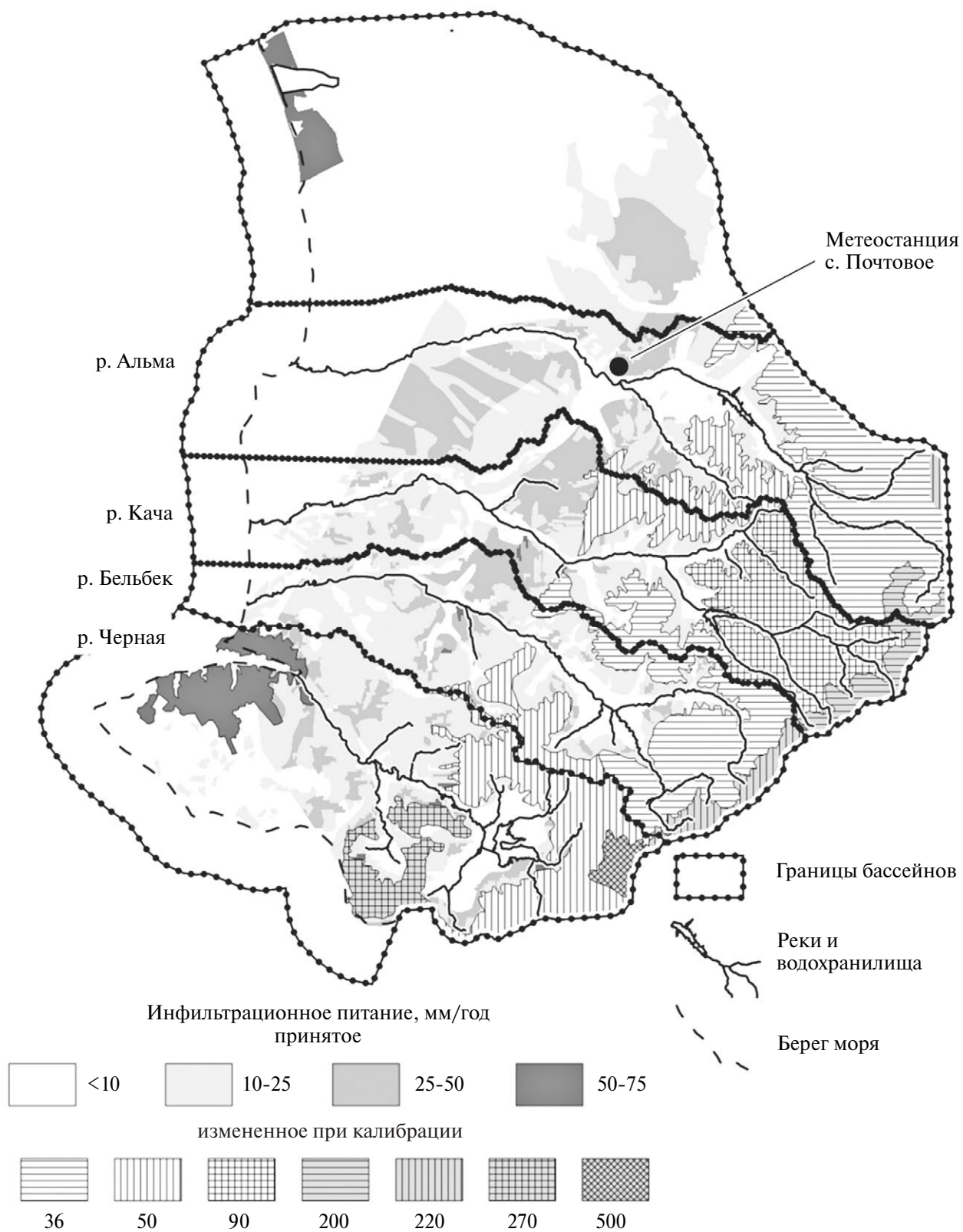


Рис. 4. Карта среднемноголетнего инфильтрационного питания подземных вод юго-западного Крыма на современный период.

подземных вод в районе Ай-Петринской Яйлы больше, чем поверхностный водосборный бассейн истока рек Черной и Узунджа, а именно по нему проходит внешняя граница моделируемой области.

ДАУНСКЕЙЛИНГ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ И ПОСТРОЕНИЕ КАРТ ДИНАМИКИ ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ В XXI В.

В меняющемся климате на протяжении XXI в. наибольшее влияние на условия формирования инфильтрационного питания, по-видимому, будут оказывать климатические траектории, обу-

словленные максимальной концентрацией парниковых газов. Поэтому для прогноза выбраны экстремальный климатический сценарий SSP5-8.5 (RCP 8.5) [19] и ансамбль МОЦАО из семейства CMIP5. Для даунскейлинга прогнозных моделей использовался стохастический генератор метеорядов суточного разрешения LARS-WG [18]. На первом этапе был составлен ансамблевый прогноз изменения метеоусловий на конец XXI в. для предгорного лесостепного климата путем даунскейлинга результатов 19 МОЦАО для сценария SSP5-8.5 на основе многолетних суточных рядов метеорологических данных метеостанции с. Почтового (рис. 4). В результате для прогноза по каждой МОЦАО сгенерированы

Таблица 3. Среднегодовое количество осадков, температура, потенциальная эвапотранспирация, индекс увлажнения и инфильтрационное питание для лесостепного ландшафта с горно-лесными почвами

Модель	Осадки		Температура		Потенциальная эвапотранспирация		Индекс увлажнения		Инфильтрационное питание	
	P , мм/год	ΔP , мм/год	T , град	ΔT , град	PET	PET/PET _{base}	$I = P/PET$	ΔI	w , мм/год	Δw , мм/год
ACCESS1-3	463	-56	16.7	5.3	1014	1.21	0.46	-0.17	4.0	-14.1
BCC-CSM1-1	473	-47	15.3	3.8	930	1.11	0.51	-0.11	11.7	-6.3
CanESM2	544	25	16.4	5.0	966	1.16	0.56	-0.06	11.6	-6.5
CMCC-CM	417	-103	16.4	5.0	981	1.17	0.42	-0.2	2.5	-15.5
CNRM-CM5	641	121	15.2	3.8	931	1.11	0.69	0.07	38.4	20.4
CSIRO-MK36	472	-47	15.1	3.7	971	1.16	0.49	-0.14	6.6	-11.4
EC-EARTH	524	4	15.0	3.6	926	1.11	0.57	-0.06	17.1	-1.0
GFDL-CM3	511	-9	17.7	6.3	1065	1.28	0.48	-0.14	3.8	-14.3
GISS-E2-R-CC	461	-58	14.9	3.5	931	1.12	0.49	-0.13	5.1	-13.0
HadGEM2-ES	474	-46	16.5	5.0	1036	1.24	0.46	-0.16	8.0	-10.0
INMCM4 "средняя"	454	-66	14.4	3.0	913	1.09	0.5	-0.13	10.8	-7.22
IPSL-CM5A-MR "сухая"	402	-118	17.0	5.6	998	1.2	0.4	-0.22	3.2	-14.8
MIROC-ESM	438	-82	17.7	6.3	1030	1.23	0.43	-0.2	4.5	-13.5
MIROC5	520	1	16.1	4.7	995	1.19	0.52	-0.1	17.2	-0.8
MPI-ESM-MR	474	-45	14.9	3.5	923	1.11	0.51	-0.11	13.3	-4.8
MRI-CGCM3 "влажная"	552	33	15.2	3.7	933	1.12	0.59	-0.03	18.0	-0.1
NCAR-CCSM4	478	-41	15.1	3.7	955	1.14	0.5	-0.12	9.4	-8.7
NCAR-CESM1-CAM5	468	-51	16.3	4.9	1020	1.22	0.46	-0.16	6.8	-11.3
NorESM1-M	492	-28	15.4	3.9	965	1.16	0.51	-0.11	11.4	-6.7
Baseline	519	0	11.4	0.0	835	1	0.62	0	18.1	0.0

100-летние стационарные ряды осадков, температуры и солнечной радиации, отвечающие прогнозным условиям конца XXI в. Затем для одного из наиболее распространенных на рассматриваемой территории ландшафтов проведено моделирование формирования инфильтрационного питания [2] по разным прогнозным рядам метеорологических характеристик. Среднегодовые характеристики прогнозных метеорологических условий по 19 МОЦАО и результаты расчета соответствующего им среднегодового инфильтрационного питания в сопоставлении с современными условиями (“Baseline”) представлены в табл. 3.

Анализ результатов, приведенных в табл. 3, показал, что только одна модель (CNRM-CM5) дает на конец XXI в. весьма существенное (на >140 мм) увеличение осадков и, как следствие, существенное увеличение питания. Эта модель была исключена из дальнейшего анализа, так как ее результат можно рассматривать как выброс из ансамбля прогнозов. Из оставшихся 18 моделей для прогнозных расчетов инфильтрационного питания для всей исследуемой территории на основе изменений индекса увлажнения выбраны три модели, характеризующие весь спектр неопределенности климатических прогнозов: “сухая” модель – IPSL-CM5A-MR, “влажная” модель – MRI-CGCM3 и “средняя” модель – INMCM4.

Далее для каждой из выбранных климатических моделей с шагом 20 лет от 2040 до 2100 г. проводились генерация климатических рядов и расчет питания подземных вод в области предгорной и равнинной частей территории по той же методике, что и для современного периода.

Прогноз изменения питания подземных вод в горной части репрезентативного бассейна составлен по разработанной модели формирования стока карстового массива “осадки–сток”, учитывающей специфику карстовых регионов с поверхностными формами карстопроявления [5]. Данная модель откалибрована на основе воспроизведения среднегодового расхода Скульского источника, расположенного в горной части репрезентативного бассейна. По результатам прогноза для сценария SSP5-8.5 по этой модели на конец XXI в. получено следующее относитель-

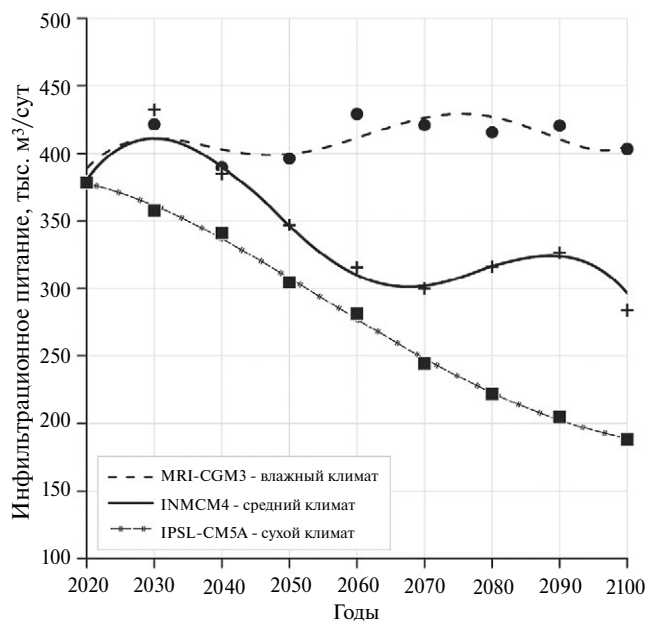


Рис. 5. Прогнозная динамика изменения суммарного расхода инфильтрационного питания в XXI в.

ное изменение прогнозного среднегогодового расхода Q по отношению к расходу при отсутствии климатических изменений Q_{base} для трех выбранных МОЦАО: “средняя” (INMCM4) – $Q/Q_{base} = 0.85$; “влажная” (MRI-CGCM3) – $Q/Q_{base} = 1.05$; “сухая” (IPSL-CM5A-MR) – $Q/Q_{base} = 0.54$. Эти соотношения в дальнейшем использовались при составлении прогнозных карт питания для определения изменения инфильтрационного питания на всей области горных склонов и плато. При этом изменение инфильтрационного питания в горной части описывается линейной моделью от начального (принятого за 1 д.е. на 2020 г.) до рассчитанных значений на конец XXI в. На рис. 5 показана динамика изменения суммарного расхода среднегогодового инфильтрационного питания за весь прогнозный период для каждой из трех выбранных климатических моделей.

ПОСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ГЕОФИЛЬТРАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЮГО-ЗАПАДНОГО КРЫМА

Численные эксперименты, воспроизводящие возможные изменения режима и баланса подземных вод при сохраняющемся водоотборе

и меняющемся питании подземных вод, проводились на откалиброванной на современный период геофильтрационной модели для каждого из показанных на рис. 5 возможных прогнозов изменения инфильтрационного питания. Для этого моделирование проводилось в нестационарной постановке с 2020 по 2100 г. В качестве начальных условий использовались уровни

подземных вод, инфильтрационное питание и меженные расходы рек, полученные при калибровке модели на современный период. Прогнозное климатическое изменение инфильтрационного питания задавалось с шагом в 10 лет.

Расчеты проводились для трех климатических моделей, которые были описаны ранее. Для рав-

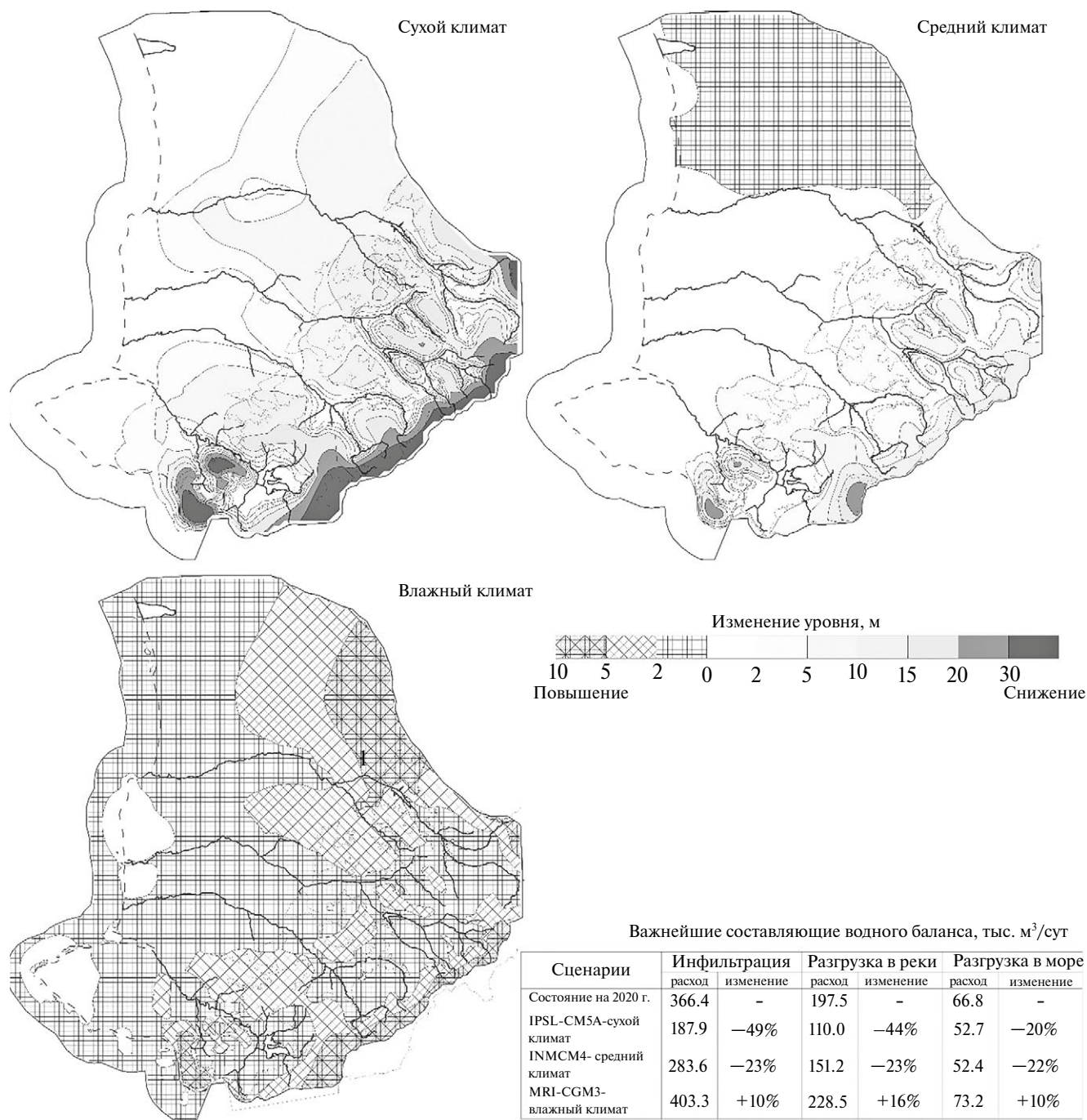


Рис. 6. Модельные схемы изменения уровней подземных вод на конец XXI в.

нинной части использованы соответствующие прогнозные карты инфильтрационного питания, а для горной части – рассчитанные по родниковому стоку его относительные изменения. Таким образом, модельный эксперимент был поставлен на трех вариантах геофильтрационной модели, отличающихся друг от друга только параметрами инфильтрационного питания.

В сравнительной табл. 4 показано изменение элементов баланса подземных вод на конец XXI в. для каждого из трех выполненных прогнозных экспериментов. Из табл. 4 следует, что изменение питания подземных вод к концу XXI в. компенсируется в основном за счет сокращения речного стока. На картах изменения уровней (рис. 6) видно, что наибольшее снижение уровней подземных вод ожидается в пределах горной части, что будет сопровождаться снижением в первую очередь поверхностного стока в верховьях рек.

Полученное при моделировании снижение уровней приводит к сокращению емкостных запасов подземных вод. Это сокращение обеспечивает несколько меньшую, чем сокращение речного стока, часть компенсации изменения питания подземных вод. Таким образом, уменьшение разгрузки подземных вод в гидросеть и емкостные запасы обеспечивают существенную адаптацию к возможному уменьшению инфильтрационного питания на фоне существующего водоотбора в течение XXI в.

Разгрузка подземных вод в море меняется незначительно. Вероятно, это обусловлено расположением водозаборов – большая их часть расположена вблизи берега моря и перехватывает естественный поток подземных вод.

Полученный разброс результатов моделирования между тремя климатическими моделями связан с тем, что прогнозируемое изменение годовых сумм осадков имеет значительный диапазон для выбранных МОЦАО, приводящий к существенным неопределенностям в изменении прогнозного инфильтрационного питания.

ВЫВОДЫ

По результатам проведенного модельного анализа можно сделать следующие ниже выводы о влиянии ожидаемых климатических изменений на подземные воды юго-западного Крыма.

Ансамблевый прогноз климатических изменений в течение XXI в. показал, что при одном и том же неблагоприятном климатическом сценарии SSP5-8.5, по результатам всех используемых МОЦАО, наблюдается повышение температуры приземной атмосферы в исследуемом регионе, но прогнозируемое изменение годовых сумм осадков имеет значительный разброс от модели к модели, приводящий к существенным неопределенностям в изменениях прогнозного инфильтрационного питания.

Проведенное моделирование прогнозного инфильтрационного водообмена с использованием результатов даунскейлинга прогноза по ансамблю МОЦАО показало, что изменение среднесезонного инфильтрационного питания имеет высокую, по сравнению с существующим, корреляцию с изменением прогнозного индекса увлажнения. Это позволило ранжировать все используемые МОЦАО по прогнозируемому индексу увлажнения и выбрать для дальнейшего использования три климатических прогноза: по “су-

Таблица 4. Прогнозный баланс подземных вод согласно трем климатическим моделям в сопоставлении с современными условиями на конец XXI в., тыс. м³/сут

Расчетная МОЦАО	Питание подземных вод			Разгрузка подземных вод		
	инфильтрация	приток с севера	емкостные запасы	в реки	водоотбор скважинами	в море
Состояние на 2020 г.	366.4	25.6	0.0	197.5	127.7	66.8
IPSL-CM5A – сухой климат	187.9	28.7	73.8	110.0	127.7	52.7
INMCM4 – средний климат	283.6	26.9	20.8	151.2	127.7	52.4
MRI-CGM3 – влажный климат	403.3	25.7	0.4	228.5	127.7	73.2

хой” модели – IPSL-CM5A-MR, по “средней” модели – INMCM4 и по “влажной” модели – MRI-CGCM3.

Диапазон прогнозного уменьшения среднесуточного инфильтрационного питания для наиболее распространенного равнинного ландшафта юго-западного Крыма составляет от 0.1 мм/год для “влажной” и до 15 мм/год для “сухой” МОЦАО. Диапазон изменения инфильтрационного питания в горной части варьирует от увеличения на 5% для “влажной” модели до уменьшения на 46% для “сухой” модели.

Наибольшее изменение ресурсов подземных вод юго-западного Крыма будет в случае, если в течение XXI в. произойдет снижение осадков на ~49%, как предсказывает “сухая” модель – IPSL-CM5A-MR. В случае если ситуация будет развиваться по “влажной” модели – MRI-CGCM3, то, несмотря на увеличение температуры, не произойдет уменьшения ни подземного стока, ни минимального стока рек. В случае ситуации по “средней” модели – INMCM4, по которой осадки уменьшатся на 23%, сократится разгрузка подземных вод в реки на 23% и в море – на 22%. Это сокращение разгрузки и сработка емкостных запасов компенсируют снижение приходной части баланса подземных вод – инфильтрационно-го питания.

Результаты прогнозного геофильтрационного моделирования на основе “сухой” климатической модели, характеризующейся 49%-м уменьшением инфильтрационного питания, показали наибольшее снижение уровней подземных вод к концу XXI в. по сравнению с двумя другими моделями. Однако это снижение уровней, вызванное “дефицитом” инфильтрационного питания, компенсируется на ~40% сработкой емкостных запасов подземных вод, на ~50% – сокращением речного стока и на ~10% – сокращением разгрузки в море и притоком с севера. При этом, даже по этой наиболее неблагоприятной с позиций естественных ресурсов модели, к концу XXI в. сокращение разгрузки подземных вод в море составит ~20% от рассчитанной на 2020 г. Таким образом, уменьшение разгрузки подземных вод в гидросеть и емкостные запасы обеспечивают существенную адаптацию к возможному умень-

шению инфильтрационного питания на фоне существующего водоотбора в течение XXI в.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Мотовилов Ю.Г., Гусев Е.М. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Фундамент. приклад. климатология. 2021. Т. 7. № 1. С. 36–79.
2. Гриневский С.О., Поздняков С.П. Принципы региональной оценки инфильтрационного питания подземных вод на основе геогеологических моделей // Вод. ресурсы. 2010. Т. 37. № 5. С. 543–557.
3. Каюкова Е.П., Юровский Ю.Г., Устюгов Д.Л., Гребнева А.В. Пресные воды Крыма // Геология и недрапользование. 2021. № 1. С. 92–103.
4. Косицкий А.Г., Богуцкая Е.М., Гречушникова М.Г., Григорьев В.Ю., Сазонова А.А., Харламов М.А., Фролова Н.Л. Оценка собственных возобновляемых водных ресурсов Крымского полуострова // Вод. ресурсы. 2022. Т. 49. № 4. С. 423–436.
5. Поздняков С.П., Бакиевская В.А., Чиганов И.А. Моделирование родникового стока в трещинно-карстовом массиве в условиях климатических изменений // Инженерная геология. 2023. Т. 18. № 2. С. 30–42.
6. Приблуда В.Д., Коджаспиров А.А., Дублянский В.Н. Баланс подземных вод юго-западной части Горного Крыма // Геол. журнал. 1979. Т. 39. № 2. С. 38–46.
7. Пугач Л.С., Кокорева С.В. Создание комплектов гидрогеологических и инженерно-геологических карт масштаба 1 : 1000000 по группе листов территории Российской Федерации в 2017–2019 гг. М.: Гидроспецгеология, 2019.
8. Токарев С.В. Уязвимость карстовых подземных вод горного Крыма к загрязнению: выявление, оценка и картирование. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Симферополь: КФУ, 2020. 26 с.
9. Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Гельфан А.Н., Сазонов А.А., Шевченко А.И. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: Обзор публикаций. 1 Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Вод. ресурсы. 2022. Т. 49. № 3. С. 251–269.
10. Харитоновна Н.А., Филимонова Е.А., Картунов Е.В., Самарцев В.Н., Дробязко Е.В., Сорокоумова Я.В.,

- Гречушникова М.Г., Прошкина А.Л., Поздняков С.П.* Изотопно-геохимические характеристики природных вод юго-западной части крымского полуострова // *Вод. ресурсы.* 2022. Т. 49. № 4. С. 474–491.
11. *Чиганов И.А., Гриневский С.О., Поздняков С.П.* Геогидрологическое моделирование для оценки влияния климатических изменений на питание подземных вод // *Тр. Всерос. науч. конф. и с международ. участием “Современная гидрогеология: актуальные вопросы науки, практики и образования.”* М., 2023. С. 227–232.
 12. *Шестопалов В.М., Богуславский А.С., Климчук А.Б., Фесенко А.В., Годенко Г.Е.* Моделирование ресурсов подземных вод юго-западной части Горного Крыма // *ГПИМО.* 2008. № 4. <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-resursov-podzemnyh-vod-yugo-zapadnoy-chasti-gornogo-kryma> (дата обращения: 05.04.2024)
 13. *Blöschl G. et al.* Twenty-three Unsolved Problems in Hydrology (UPH) – a community perspective // *Hydrol. Sci. J.* 2019. V. 64. № 10. P. 1141–1158. doi.org/10.1080/02626667.2019.1620507
 14. *Cuthbert M.O., Gleeson T., Moosdorf N., Befus K.M., Schneider A., Hartmann J., Lehner B.* Global patterns and dynamics of climate–groundwater interactions // *Nature Clim. Change.* 2019. V. 9. P. 137–141. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0386-4>
 15. *Kuang X., Liu J., Scanlon B.R., Jiao J.J., Jasechko S., Lancia M., Biskaborn B.K., Wada Y., Li H., Zeng Zh., Guo Zh., Yao Y., Gleeson T., Nicot J-P., Luo X., Zou Y., Zheng Ch.* The changing nature of groundwater in the global water cycle // *Sci.* 2024. V. 383. I. 6686. DOI: 10.1126/science.adf0630
 16. *Langevin C.D., Hughes J.D., Banta E.R., Niswonger R.G., Panday S., Provost A.M.* Documentation for the MODFLOW 6 Groundwater Flow Model. Reston, VA: USGS Publications Warehouse, 2017. P. 197. <https://doi.org/10.3133/tm6A55>
 17. *Moss R.H., Edmonds J.A., Hibbard K.A., Manning M.R., Rose S.K., van Vuuren D.P., Carter T.R., Emori S., Kainuma M., Kran T., Meehl G.A., Mitchell J.F.B., Nakicenovic N., Riahi K., Smith S.J., Stouffer R.J., Thomson A.M., Weyant J.P., Wilbanks T.J.* The next generation of scenarios for climate change research and assessment // *Nature.* 2010. V. 463. P. 747–756.
 18. *Semenov M.A., Barrow E.M.* LARS-WG A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies. Harpenden, 2002. P. 28.
 19. *Taylor K., Stouffer R., Meehl G.* An overview of CMIP5 and the experiment design // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2015. V. 93. I 4. P. 485–498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
 20. *Winston R.B.* ModelMuse version 4: A graphical user interface for MODFLOW 6. Scientific Investigations Report. Reston, VA: USGS Publ. Warehouse, 2019. P. 2019–5036. <https://doi.org/10.3133/sir20195036>
 21. *Zomer R.J., Xu J., Trabucco A.* Version 3 of the global aridity index and potential evapotranspiration database // *Sci. Data.* 2022. V. 9. I. 409.

ASSESSMENT OF THE IMPACTS OF CLIMATE CHANGE IN THE 21ST CENTURY ON THE GROUNDWATER BALANCE OF THE SOUTH-WESTERN CRIMEA

V. N. Samartsev^a, I. A. Chiganov^{a, *}, S. O. Grinevsky^a, S. P. Pozdnyakov^a, Ya. V. Sorokoumova^a,
V. A. Bakshevskaya^b

^aLomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

^bInstitute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Ivankovskaya Research Station, Konakovo, Tver region, 171251 Russia

*e-mail: ilya-chiganov@mail.ru

A regional groundwater flow model of southwestern Crimea within the Alma artesian basin and the adjacent area of fissure-karst groundwater in Mountain Crimea was developed and calibrated for the modern period. On the basis of numerical experiments with this model, changes in groundwater resources under the influence of expected climatic changes in the 21st century were estimated. For this purpose, predictive maps of infiltration recharge were constructed for the selected study area. The predictive maps of groundwater recharge were developed for the plain part of the study area using infiltration water exchange modeling. For the mountainous part, precipitation accumulation by surface karst forms was considered in the prediction of recharge. The extreme climate change scenario SSP5-8.5 from the GSM models of the CMPI 5 family, which assumes maximum warming, was used as the prediction scenario. As a result of ensemble forecasting, the most contrasting scenarios of aridity index change were selected and three projected maps of groundwater recharge change in the 21st century were obtained, which were then used in numerical experiments. The predicted infiltration recharge values significantly differ from the current figure of 366400 m³/day: under the «dry» climate, the recharge is 187900 m³/day, under the «average» climate, 283600 m³/day, and under the «wet» climate, 403300 m³/day. The results of the predictive groundwater balance modeling for the 21st century, using these recharge maps, demonstrated the high adaptive capacity of groundwater reserves and the reduction of minimum river runoff over the study period of about a hundred years, assuming the continuation of the current groundwater extraction rates.

Keywords: groundwater flow model, calibration, groundwater balance, climate change, infiltration recharge map, downscaling, prediction