

УДК 556.3

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2026-65-2-26-34

ОЦЕНКА ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД РАВНИННОГО КРЫМА В СОВРЕМЕННЫХ И ПРОГНОЗНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Сергей Олегович Гриневский^{1✉}, Илья Андреевич Чиганов²,
Сергей Павлович Поздняков³

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; sogrinev@mail.ru ✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ilya-chiganov@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; sppozd@mail.ru

Аннотация. Оценка среднесуточного инфильтрационного питания подземных вод на юго-западной территории равнинного Крыма в границах Альминского артезианского бассейна проведена на основе гео-гидрологического моделирования процессов его формирования при современных климатических условиях и различных прогнозных сценариях их изменений на конец XXI века. Для моделирования использованы глобальные климатические модели семейства CMIP5 при экстремальном сценарии SSP5-8.5, адаптированные к климатическим условиям изучаемой территории. На основе построения карт среднесуточного инфильтрационного питания при современных и наиболее контрастных ожидаемых климатических условиях показано, что, несмотря на прогнозируемое уменьшение индекса увлажнения, существенное сокращение инфильтрационного питания подземных вод на рассматриваемой территории возможно только при самом экстремальном «засушливом» климатическом сценарии.

Ключевые слова: изменение климата, инфильтрационное питание, моделирование, Альминский артезианский бассейн

Для цитирования: Гриневский С.О., Чиганов И.А., Поздняков С.П. Оценка инфильтрационного питания подземных вод равнинного Крыма в современных и прогнозных климатических условиях // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2026. № 2. С. 26–34.

ASSESSMENT OF GROUNDWATER RECHARGE IN THE PLAIN CRIMEA UNDER MODERN AND PREDICTED CLIMATIC CONDITIONS

Sergey O. Grinevskiy^{1✉}, Ilya A. Chiganov², Sergey P. Pozdnyakov³

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; sogrinev@mail.ru ✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ilya-chiganov@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; sppozd@mail.ru

Abstract. An assessment of the average long-term groundwater recharge in the southwestern part of the Crimean plain within the Alma artesian basin was carried out on the basis of geohydrological modeling of the processes of its formation under modern climatic conditions and various forecast scenarios for their changes at the end of the 21st century. For modeling, global climate models of the CMIP5 family were used under the extreme scenario SSP5-8.5, adapted to the climatic conditions of the study area. Based on the modelled maps of average long-term groundwater recharge under current and most contrasting expected climatic conditions, it is shown that, despite the predicted decrease in the moisture index, a significant recharge reduction in the considered region is possible only under the most extreme “dry” climate scenario.

Keywords: climate change, groundwater recharge, modeling, Alma artesian basin

For citation: Grinevskiy S.O., Chiganov I.A., Pozdnyakov S.P. Assessment of groundwater recharge in the plain Crimea under modern and predicted climatic conditions. *Moscow University Geol. Bull.* 2026; 2: 26–34. (In Russ.).

Введение. Формирование естественных ресурсов подземных вод на полуострове Крым в основном происходит за счет инфильтрационного водообмена поверхностных и подземных вод [Каюкова, Юровский, 2016]. Нисходящий поток влаги к уровню грунтовых вод в зоне аэрации, создающий инфильтрационное питание (ИП) возникает в результате процессов трансформации осадков на поверхности земли и в почве. В стационарных климатических условиях этот поток в каждой точке

меняется во внутригодовом и многолетнем разрезе, однако его среднесуточная величина, то есть среднесуточное инфильтрационное питание, является постоянной, и именно оно создает основную приходную часть баланса подземных вод зоны активного водообмена. Глобальные климатические изменения температуры воздуха, количества и интенсивности выпадающих осадков приводят к перестройке водно-балансовых процессов на поверхности земли и в зоне аэрации, что может оказать

существенное влияние на условия формирования инфильтрационного питания [Grinevskiy, et al., 2021] и, следовательно, на естественные ресурсы подземных вод полуострова.

В связи со спецификой геологического строения и высотной зональностью Крыма, основной областью формирования его водных ресурсов является горная часть, сложенная закарстованными известняками. В Горном Крыму, составляющем порядка 20 % площади полуострова, выпадает большое количество осадков (до 1000 мм/год) и происходит интенсивное питание подземных вод за счет их инфильтрации и инфлюации на карстовых плато. Здесь же осуществляется и основная разгрузка подземных вод в виде многочисленных родников, являющихся истоками рек Кача, Бельбек, Черная, Альма и др., по которым происходит транзит поверхностного и подземного стока в Равнинный Крым [Богущая и др., 2020; Приблуда и др., 1979]. На большой территории последнего, несмотря на то, что там выпадает меньшее количество осадков (до 400–500 мм/год), также формируется площадное ИП, обеспечивающее, по-видимому, значительную часть естественных ресурсов подземных вод полуострова. Количественная оценка величины этого питания, а также его пространственной изменчивости на основе анализа процессов инфильтрационного водообмена для территории Равнинного Крыма ранее не проводилось. Поэтому основной целью исследования в настоящей работе является оценка среднеемноголетнего ИП юго-западной части Крыма в границах равнинной и предгорной части Альминского артезианского бассейна, где происходит интенсивная эксплуатация подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Исследования проведены на основе геогидрологического моделирования процессов формирования ИП [Гринеvский, Поздняков, 2010] при современных климатических условиях и при разных сценариях их изменения к концу XXI века.

Современные климатические условия охарактеризованы многолетними рядами метеорологических данных по метеостанциям, а прогнозные изменения осадков и температуры воздуха на конец XXI века описываются глобальными Моделями общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО). Локальное использование глобальных МОЦАО основано на их даунскейлинге и адаптации к климатическим условиям юго-западного Крыма.

Характеристика района исследований. Полуостров Крым в структурно-тектоническом отношении расположен на южной окраине Восточно-Европейской платформы. Согласно современному гидрогеологическому районированию в пределах Крымского полуострова выделяются три гидрогеологических структуры I порядка: Восточно-Европейский сложный артезианский бассейн, Скифский сложный артезианский бассейн (ССАБ) и Крымская сложная гидрогеологическая складчатая область.

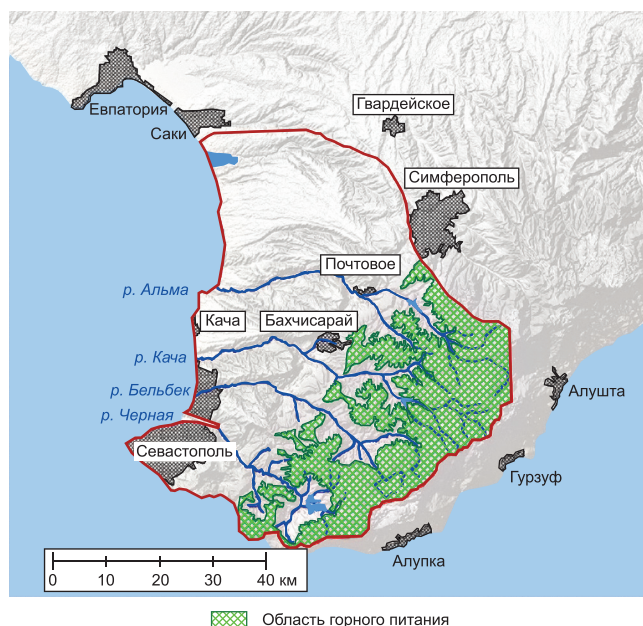


Рис. 1. Обзорная карта с границей территории исследования

Большая часть территории юго-западного Крыма относится к Альминскому артезианскому бассейну (ААБ), входящему в ССАБ, и его горному обрамлению (рис. 1) — гидрогеологической структуре с особыми условиями формирования подземных вод, где происходит их интенсивная эксплуатация наиболее крупными водозаборами для хозяйственно-питьевого водоснабжения.

В гидрогеологическом разрезе территории ААБ выделяются следующие основные водоносные комплексы: четвертичный, неогеновый, палеогеновый, меловой, верхнеюрский, а также водоносные зоны верхнетриасово-среднеюрской экзогенной трещиноватости и кайнозойско-мезозойской эндогенной трещиноватости. Каждый из вышеперечисленных водоносных комплексов объединяет несколько гидрогеологических подразделений разной степени водоносности, которые в пределах площади его распространения образуют единую водоносную систему, на отдельных участках разделенную слабопроницаемыми слоями.

Внешней областью питания подземных вод ААБ является его горное обрамление, сложенное в основном известняками юрского возраста и породами таврической серии. В горной части формирование инфильтрационного питания имеет локально-инфлюационный характер, в связи с интенсивным развитием поверхностного карста [Вахрушев и др., 2022; Приблуда и др., 1979]. На территории равнинной и предгорных частей ААБ формируется площадное ИП, неоднородность которого обусловлена различиями процессов трансформации выпадающих осадков в зависимости от ландшафтных и почвенных условий при многообразии строения подстилающей зоны аэрации. Прогнозные климатические изменения ИП могут существенно повлиять на режим

эксплуатации подземных вод и водообеспеченность данного региона в целом.

В настоящей работе рассматривается только предгорная и равнинная части ААБ, где применима схема «диффузионной» (площадной) инфильтрации, при которой возможна количественная оценка среднемноголетних величин ИП на основе геогидрологического моделирования процессов его формирования в различных ландшафтных и почвенных условиях. Деление территории на высокогорную и равнинно-предгорную области проведено по изолинии рельефа 400 м, которая хорошо коррелируется с границей распространения юрских известняков и пород таврической серии в горной части и относительно пологозалегающей слоистой толщи меловых и более молодых отложений в равнинной (рис. 1). Водоносные горизонты и комплексы этой толщи, моноклинально залегающей с наклоном в сторону моря, преимущественно сложены карбонатными отложениями и песчаниками, разделенными слабопроницаемыми глинистыми отложениями.

На большей части рассматриваемой территории зона аэрации, представленная различными песчано-глинистыми отложениями, имеет значительную мощность, и за исключением локальных участков речных долин, уровень грунтовых вод (УГВ) залегает на достаточно больших глубинах — до 10 м и более. Это исключает эвапотранспирационный отток влаги с УГВ и обеспечивает формирование максимального при данных ландшафтно-климатических условиях ИП.

Методика проведения исследований. Анализ влияния климатических изменений на подземные воды юго-западного Крыма проводился сравнением карт среднемноголетнего ИП для современных климатических условий и при их прогнозных изменениях к концу XXI века. При этом принималось, что ландшафтные и почвенные характеристики рассматриваемой территории останутся без изменений.

Оценка среднемноголетнего ИП на основе геогидрологического моделирования. На первом этапе исследований проведена оценка среднемноголетнего ИП при современных климатических условиях, путем последовательного решения следующих задач [Гриневский, Поздняков, 2010]:

1. Районирование территории по комплексу ландшафтных и гидрогеологических факторов с выделением участков территории — типовых ландшафтов (ТЛ), отличающихся по условиям формирования инфильтрации;

2. Построение расчетных моделей трансформации осадков на поверхности земли и инфильтрационного водообмена в зоне аэрации для выделенных ТЛ;

3. Моделирование формирования водного баланса на поверхности земли (программа SurfBal [Гриневский, Поздняков, 2010; Pozdniakov, et al., 2015]) и в зоне аэрации (программа HYDRUS 1D [Šimůnek, et al., 2009]) для каждого ТЛ и количественная оценка его среднемноголетних составляющих — суммарной

эвапотранспирации, поверхностного стока и нисходящего потока на УГВ — ИП;

4. Построение итоговой карты среднемноголетнего инфильтрационного питания подземных вод.

Моделирование современных условий ИП проведено на основе многолетних рядов метеорологических характеристик суточного разрешения по метеостанциям за период 2006–2021 гг., а для его прогнозных расчетов на конец XXI в. использованы синтезированные многолетние ряды осадков и температуры воздуха, полученные с помощью стохастического генератора LARS-WG 6.0 [Semenov, Stratonovitch, 2015] на период 2070–2090 гг.

Методика построения климатических прогнозов. Современный модельно-ориентированный подход к оценке прогнозных климатических изменений основан на сценариях социально-экономического развития в XXI веке. Одним из главных интегральных показателей упомянутых сценариев является дополнительная радиационная нагрузка, отвечающая разным концентрациям CO_2 в атмосфере. Для прогноза изменения климата под влиянием этой дополнительной нагрузки использовался ансамбль МОЦАО, входящих в пятую фазу проекта CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК).

У каждой климатической модели, входящей в семейство МОЦАО, используется набор различных сценариев, описывающих социально-экономические траектории развития мира в XXI веке — SSP (Shared Socioeconomic Pathways).

Для прогнозных расчетов изменения ИП выбран наиболее экстремальный сценарий SSP5-8.5. Это сценарий развития по пути, основанном на ископаемом топливе (SSP5), приводящем к концу XXI века к высокой радиационной нагрузке $8,5 \text{ Вт/м}^2$ [Moss, et al., 2010].

Выбор для анализа именно этого сценария связан с максимальной прогнозной концентрацией CO_2 в атмосфере, вызывающей наибольший глобальный эффект потепления климата, при котором следует ожидать наиболее заметные трансформации водного баланса на поверхности земли и в зоне аэрации.

Для использования и адаптации результатов прогноза климатических условий, полученных при помощи МОЦАО, применительно к конкретной территории, площадь которой существенно меньше пространственных блоков глобальных моделей, применяется даунскейлинг. В данной работе выбран метод даунскейлинга, реализованный в стохастическом генераторе временных рядов осадков, максимальной и минимальной температуры воздуха и солнечной радиации LARS-WG 6.0 [Semenov, Stratonovitch, 2015]. Эти ряды за счет процесса «обучения» являются статистически подобными фактическим данным измерений на конкретной метеостанции. Кроме того, используя базу данных МОЦАО из семейства CMIP 5 [Taylor, et al., 2015],

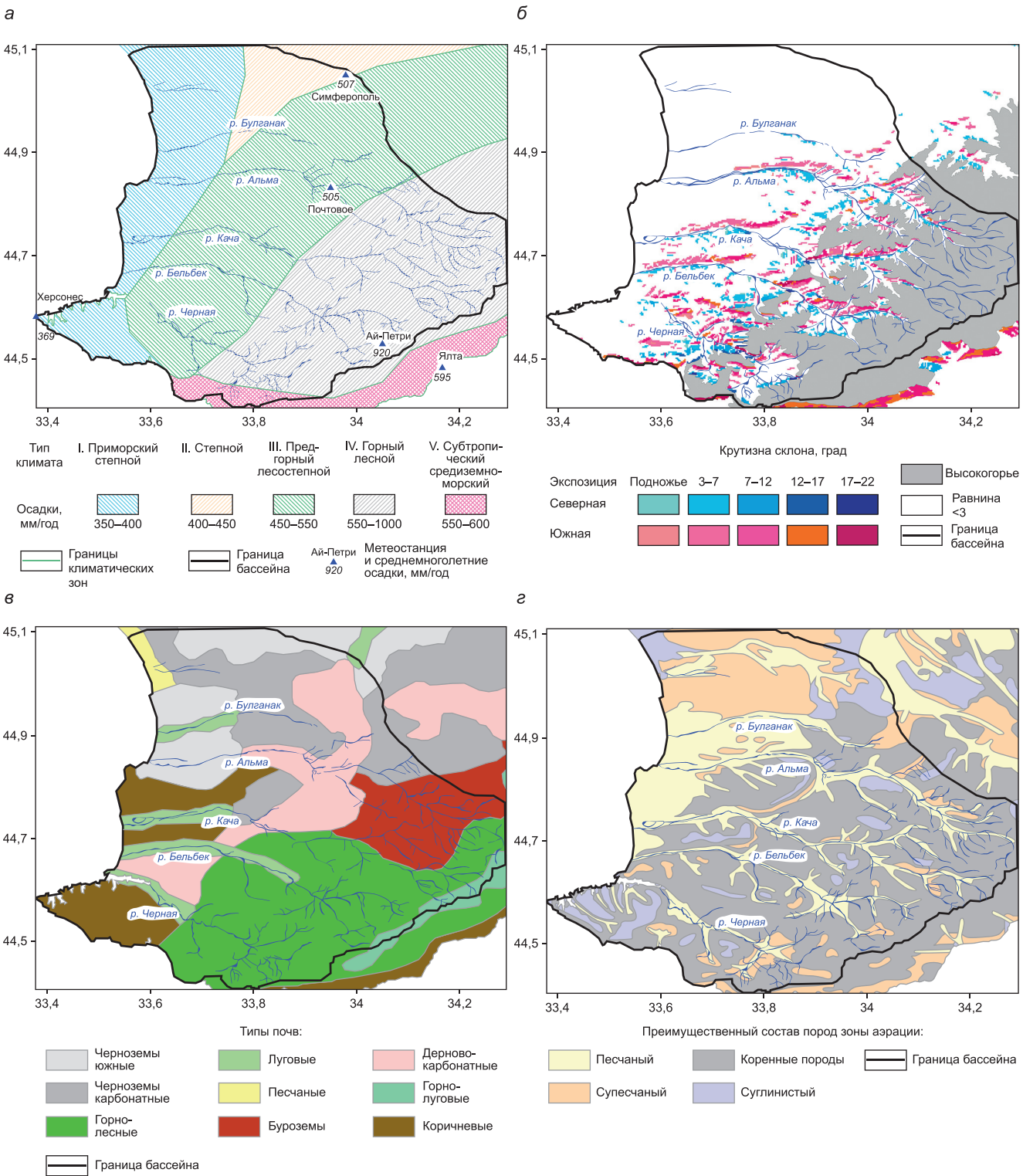


Рис. 2. Схемы районирования территории по типу климата (а), характеристикам рельефа (б), типу почвы (в), преимущественному составу пород зоны аэрации (г)

LARS-WG может включать в генерацию прогнозные изменения, которые ожидаются согласно разным моделям в каждом 20-летию XXI века. Таким образом, с помощью данного генератора, на основе его «обучения» по фактическим данным метеостанций территории, получены прогнозные ряды метеорологических характеристик на период 2070–2090 гг. по 19-ти моделям семейства МОЦАО CMIP-5 для наиболее экстремального сценария SSP5-8.5.

Результаты и их обсуждение. Оценка современного среднегодового ИП выполнена на основе районирования территории по комплексу метеорологических (климатических), ландшафтных и гидрогеологических факторов, в совокупности определяющих неоднородность условий формирования ИП. На рассматриваемой территории выделяется 5 климатических зон [Пугач, Кокорева, 2019]

Среднегодовы́е метеорологические характеристики по метеостанциям территории за период 2006–2021 гг.

Метеостанция	Осадки, мм/год	Температура воздуха, °С			Влажность воздуха, %	Скорость ветра, м/с
		сред	мин	макс		
Херсонес	369	13,96	10,88	17,13	77,3	4,0
Симферополь	507	11,00	6,38	16,39	67,4	2,1
Почтовое	505	12,30	6,87	18,36	70,9	2,0
Ялта	595	14,40	11,45	17,94	68,9	1,8
Ай-Петри	920	7,26	3,98	10,58	72,6	3,7

(рис. 2, а), которые характеризуются многолетними рядами метеорологических характеристик суточного разрешения по метеостанциям, включающим осадки, минимальную, среднюю и максимальную температуру, влажность воздуха и среднюю скорость ветра (таблица).

Различие типа поверхности и растительного покрова характеризуется выделением городских территорий и крупных водохранилищ, площадей с полевой и луговой растительностью, садов и кустарников, лесов.

Для предгорной и равнинной части исследуемой территории на основе обработки цифровой модели рельефа проведено выделение участков склонов северной и южной экспозиции при их крутизне свыше 3–5°, а также подножья этих склонов (рис. 2, б), где, согласно [Гриневский, 2014; Романова, 1977], различия водного и радиационного баланса влияют на формирование инфильтрации.

Районирование территории по типу почвенного покрова проведено на базе почвенной карты Крыма [Половицкий, Гусев, 1987], которая была генерализована путем объединения некоторых однотипных почв, схожих по своим водно-физическим свойствам (рис. 2, в).

Преимущественный состав пород зоны аэрации охарактеризован на основе карты четвертичных образований м-ба 1:1 000 000 [Карта..., 2018], в результате которого выделены следующие типы разреза (рис. 2, г):

- *песчаный* — на участках распространения аллювиальных и аллювиально-пролювиальных отложений;
- *супесчаный*, приуроченный к пролювиальным и пролювиально-делювиальным отложениям;
- *суглинистый* — на участках развития элювия и делювия;
- *коренные породы* — на участках развития с поверхности трещиноватых коренных пород, грубообломочного коллювия и деляпсия.

Итогом проведенного районирования явилась картограмма ТЛ территории исследования, исключая область горного питания (рис. 1), на которой выделено 218 ТЛ с различным сочетанием растительного покрова, типа почвы, состава пород зоны аэрации и характеристик рельефа. Для каждого из них, за исключением акваторий водохранилищ

и городских территорий с техногенными условиями инфильтрации построены расчетные модели трансформации осадков на поверхности земли и инфильтрационного водообмена в зоне аэрации.

Разрез зоны аэрации в каждом ТЛ схематизирован тремя слоями, отвечающими почвенным горизонтам: А (дернина), Е-В (иллювиальный горизонт) и С (материнские почвообразующие породы). Параметрическая характеристика почвенных горизонтов типа А и Е-В для выделенных 9-ти типов почв территории (рис. 2, в) проведена на основе данных почвенных разрезов из почвенной базы Harmonized World Soil Database и монографии [Половицкий, Гусев, 1987], а также данных аналогичных типов почв сопредельных территорий из базы данных БД Soil Почвенного института им. В.В. Докучаева. Параметры влагопереноса рассчитаны по данным фактических определений влажности при различных величинах всасывающего давления, а при их отсутствии — на основе педотрансферных функций их связи с гранулометрическим составом и плотностью сухого грунта с использованием программного кода Rosetta [Schaap, et al., 2001].

Параметры влагопереноса подстилающих материнских пород зоны аэрации, согласно проведенному районированию (рис. 2, г), приняты по типовым значениям базы данных Rosetta для песчаных (loamy sand), супесчаных (sandy loam) и суглинистых (loam) пород, а для трещиноватых коренных пород — по литературным данным [Lu, Kwicklis, 2012].

С использованием описанного выше параметрического обеспечения расчетных моделей для всех 218-ти ТЛ проведено моделирование формирования инфильтрационного питания подземных вод при помощи программных кодов SurfBal [Гриневский, Поздняков, 2010; Pozdniakov, et al., 2015] и HYDRUS 1D [Šimůnek, et al., 2009]. На первом этапе с помощью программы SurfBal рассчитывались суточные объемы впитывания влаги в почву с учетом процессов стокообразования, снегонакопления и снеготаяния, параметры которых калибровались на основе сопоставления расчетной внутригодовой динамики высоты снежного покрова с фактическими данными (рис. 3).

На втором этапе моделирования поступающая в почву влага, а также суточные величины потенциальной эвапотранспирации, рассчитанные в SurfBal,

задавались на верхней границе модели влагопереноса в зоне аэрации. При этом на нижней границе расчетного профиля зоны аэрации задавалось условие гравитационного стекания влаги, расход которого характеризует ИП при глубоком залегании УГВ. Среднегодовые величины ИП для каждого ТЛ далее получены осреднением его модельных суточных значений за расчетный период. Проведенная оценка показала существенную неоднородность среднегодового ИП на изучаемой территории, величины которого на разных ТЛ варьируют от долей мм/год до 80 мм/год (рис. 4).

Построение карты среднегодового ИП проведено на основе присвоения выделенным ТЛ соответствующих значений, полученных по результатам моделирования. Генерализация пространственной неоднородности инфильтрации с дискретностью 10–20 мм/год проведена на основе объединения ТЛ в зоны, которые характеризуются средневзвешенными по площади значениями (рис. 5). При этом суммарный расход ИП подземных вод на равнинной части рассматриваемой территории составил 83,5 тыс. м³/сут при среднем значении 12,7 мм/год. Верификация полученной карты среднегодового ИП проведена на основе геофильтрационного моделирования формирования подземного и речного стока территории [Samartsev, et al., 2024].

Прогнозная оценка инфильтрационного питания выполнена по результатам аналогичного моделирования его формирования на ТЛ на основе прогнозных рядов метеорологических характеристик, полученных с использованием LARS-WG 6.0 [Semenov, Stratonovitch, 2015] по 19-ти глобальным моделям МОЦАО из семейства CMIP5 [Taylor, et al., 2015] при экстремальном сценарии SSP5-8.5. Все 19 моделей показывают существенно различные изменения среднегодовых осадков и температуры воздуха на конец XXI века по сравнению с современными условиями (рис. 6). При этом, если прогнозный рост температуры воздуха различается только величиной, то среднегодовые осадки в разных моделях имеют разнонаправленные изменения.

Для дальнейшего анализа проведено моделирование формирования ИП на наиболее распространенном ТЛ исследуемой территории (рис. 4) по всем моделям, исключая сценарий CNRM-CM5, показывающий существенный прогнозный рост осадков и резко отличающийся от остального ансамбля (рис. 6). Результаты показали, что прогнозные изменения среднегодового ИП хорошо коррелируют с изменением расчетного общего индекса увлажнения территории I, представляющего собой отношение среднегодовых годовых сумм осадков к потенциальной эвапотранспирации (рис. 7). При этом, согласно всем моделям (за исключением CNRM-CM5) на рассматриваемой территории прогнозируются более засушливые условия, характеризующиеся уменьшением расчетного индекса увлажнения I, и, как следствие, сокращение ИП.

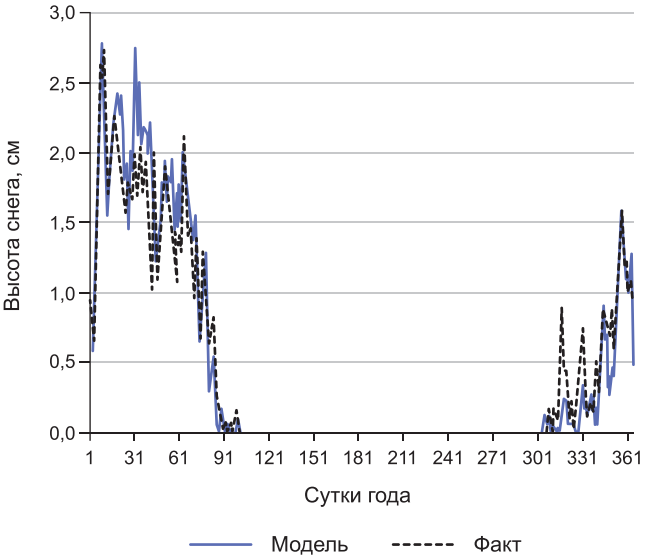


Рис. 3. Сопоставление модельной и фактической среднегодовой динамики высоты снежного покрова на примере метеостанции г. Симферополь

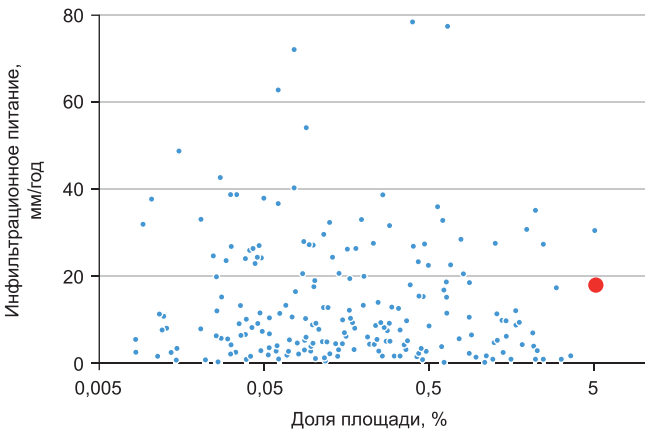


Рис. 4. Распределение среднегодового инфильтрационного питания на различных типовых ландшафтах в зависимости от их относительной площади

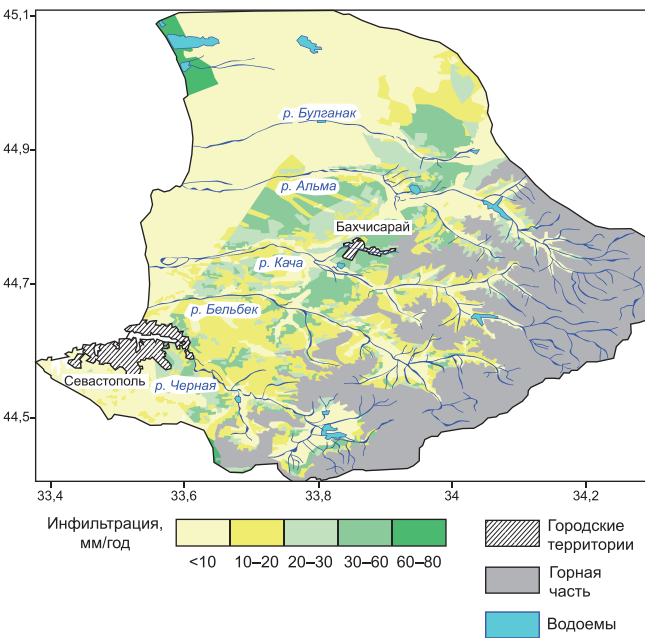


Рис. 5. Карта современного среднегодового инфильтрационного питания равнинной части юго-западного Крыма

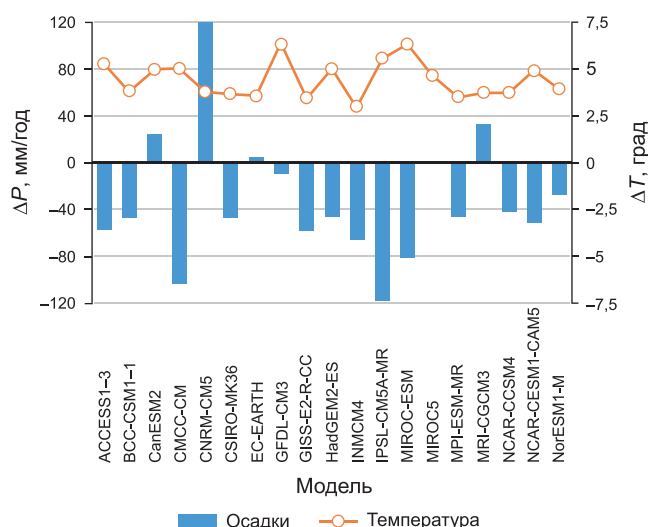


Рис. 6. Прогнозные изменения среднегогодовых значений годовых сумм осадков (ΔP) и температуры воздуха (ΔT) по 19 климатическим моделям

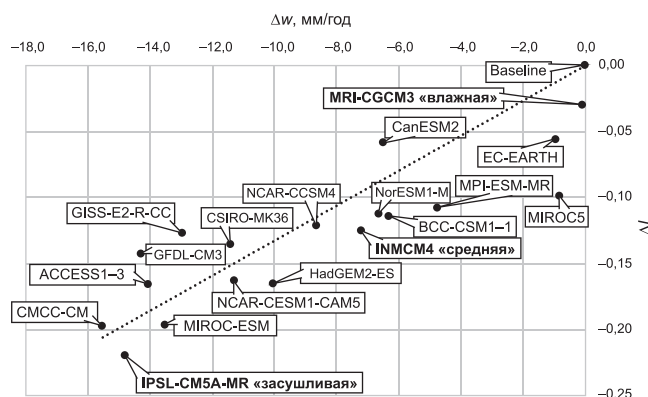


Рис. 7. Связь изменения среднегогодового инфильтрационного питания Δw с изменением индекса увлажнения ΔI для ансамбля климатических моделей семейства CMIP5 сценария SSP5-8.5

Полученная зависимость позволила выбрать для дальнейшего анализа три различных климатических модели, наиболее контрастные по сравнению с существующими условиями (Baseline): «засушливую» (IPSL-CM5A-MR) и «влажную» (MRI-CGCM3), а также «среднюю» (INMCM4) (рис. 7).

На их основе проведено моделирование инфильтрации для всей рассматриваемой территории и построены соответствующие прогнозные карты среднегогодового ИП, согласно методике, рассмотренной выше. Результаты показали, что, несмотря на прогнозируемое уменьшение общего индекса увлажнения, климатические изменения суммарного среднегогодового ИП на рассматриваемой территории к концу XXI в. имеют разнонаправленные тенденции: согласно «засушливому» и «среднему» климатическим сценариям произойдет сокращение ИП на 68 % и 19 % соответственно, а при «влажном» сценарии в среднем ожидается некоторое увеличение ИП — на 13 % по сравнению с современными условиями.

При этом, если в «засушливом» климатическом сценарии на всех ландшафтах проявляется одина-

ковая тенденция к сокращению ИП, то при «влажном» сценарии, в зависимости от ландшафтных условий, направленность прогнозных изменений ИП различна и, несмотря на его незначительное увеличение на территории в целом, на некоторых ТЛ оно сокращается (рис. 8). Это доказывает существенное влияние неоднородности ландшафтных условий, почвенного покрова и пород зоны аэрации на климатические преобразования процессов формирования ИП. Анализ вариаций прогнозных климатических изменений среднегогодового ИП на разных ТЛ показывает, что в «засушливом» сценарии максимальное сокращение ИП происходит на лесном ландшафте и при песчаном составе пород зоны аэрации (рис. 8, а, ж). В то же время при «влажном» климатическом сценарии существенно большее увеличение питания происходит на склонах южной экспозиции (рис. 8, з), а также на черноземно-карбонатных почвах (рис. 8, е) и при песчаном и супесчаном составе пород зоны аэрации (рис. 8, з). При этом выявленные тенденции ландшафтной неоднородности прогнозных изменений ИП требуют детального анализа климатических преобразований всех составляющих водного баланса на поверхности земли и в зоне аэрации на разных ТЛ, что является предметом дальнейших исследований.

Выводы и заключение. На равнинной территории юго-западного Крыма различия ландшафтных и почвенных условий обуславливают существенную неоднородность среднегогодового ИП — от долей мм/год до 80 мм/год. Его среднее значение в границах равнинной части ААБ составляет 12,7 мм/год, что обеспечивает среднегогодовое восполнение подземных вод 83,5 тыс. м³/сут.

Анализ 19-ти прогнозных климатических моделей семейства МОЦАО CMIP-5 при экстремальном сценарии потепления на конец XXI века SSP5-8.5 показал существенно различные ожидаемые изменения среднегогодовых осадков и температуры воздуха при общем тренде уменьшения коэффициента увлажнения по сравнению с современными условиями. Однако, проведенное геогеологическое моделирование формирования ИП на основе трех контрастных прогнозных моделей показывает, что даже при одном и том же климатическом сценарии потепления SSP5-8.5, изменение среднегогодового ИП существенно различается и имеет разнонаправленные тенденции: согласно «засушливому» и «среднему» климатическим сценариям произойдет сокращение ИП на 68 % и 19 % соответственно, а при «влажном» сценарии ожидается некоторое увеличение ИП — на 13 % по сравнению с современными условиями. При этом существенно проявляется ландшафтная неоднородность климатических изменений процессов формирования ИП, и даже при одном климатическом сценарии прогнозируемое изменение среднегогодового ИП в зависимости от ландшафтных условий, типа почвы и пород зоны

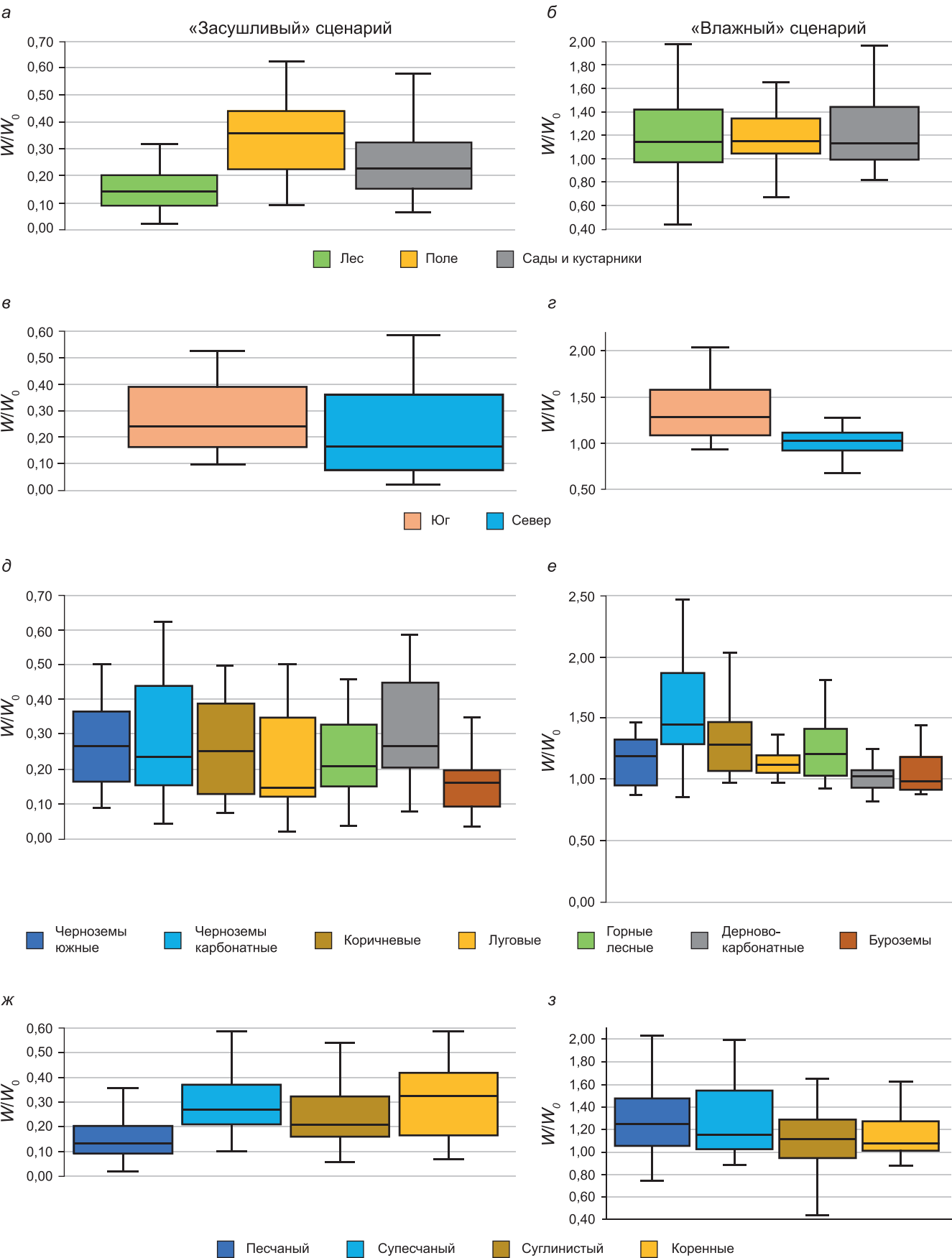


Рис. 8. Вариации прогнозных относительных изменений инфильтрационного питания (W/W_0) при «засушливом» и «влажном» климатических сценариях в зависимости от типа растительности (а, б), экспозиции склона (в, г), типа почвы (д, е) и состава пород зоны аэрации (ж, з)

аэрации может иметь не только различный масштаб, но и разную направленность.

Экстремально «засушливый» прогнозный климатический сценарий заслуживает особого внимания, поскольку более чем двукратное сокращение инфильтрационного восполнения запасов подземных вод

может существенно повлиять на работу прибрежных водозаборов, вызывая формирование интрузии морских вод, что требует дальнейшего анализа на основе прогнозного гидрогеодинамического моделирования.

Финансирование. Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 24-17-00102.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Богуцкая Е.М., Косицкий А.Г., Айбулатов Д.Н., Гречушников М.Г. Средний многолетний сток рек юго-западной части Крымского полуострова // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 2. С. 37–51.

Вахрушев Б.А., Амеличев Г.Н., Токарев С.В., Самохин Г.В. Основные проблемы гидрогеологии карста Крымского полуострова // Водн. ресурсы. 2022. Т. 49, № 4. С. 437–447.

Гринеvский С.О. Влияние рельефа на формирование инфильтрационного питания подземных вод // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2014. № 1. С. 54–60.

Гринеvский С.О., Поздняков С.П. Принципы региональной оценки инфильтрационного питания подземных вод на основе геогидрологических моделей // Водн. ресурсы. 2010. Т. 37, № 5. С. 543–557.

Карта четвертичных образований L36 (Симферополь). Лист K36 Государственной геологической карты Российской Федерации м-ба 1 : 1 000 000. ГУП Крымгеология, 2018.

Каюкова Е.П., Юровский Ю.Г. Водные ресурсы Крыма // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2016. № 1. С. 25–32.

Половицкий И.Я., Гусев П.Г. Почвы Крыма и повышение их плодородия. Симферополь: Таврия, 1987. 152 с.

Приблуда В.Д., Коджаспиров А.А., Дублянский В.Н. Баланс подземных вод юго-западной части Горного Крыма // Геологический журнал. 1979. Т. 39, № 2. С. 38–46.

Пугач Л.С., Кокорева С.В. Создание комплектов гидрогеологических и инженерно-геологических карт масштаба 1 : 1 000 000 по группе листов территории Российской Федерации в 2017–2019 гг. ФГБУ «Гидроспецгеология», 2019.

Романова Е.Н. Микроклиматическая изменчивость основных элементов климата. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 280 с.

Grinevskiy S.O., Pozdnyakov S.P., Dedulina E.A. Regional-scale model analysis of climate changes impact on the water

budget of the critical zone and groundwater recharge in the European part of Russia // Water. 2021. N 13. P. 1–19.

Lu Z., Kwicklis E. Numerical Evaluation of Effective Unsaturated Hydraulic Properties of Fractured Rocks using a Stochastic Continuum Approach // Vadose Zone Journal. 2012. DOI: 10.2136/vzj2011.0164

Moss R.H., Edmonds J.A., Hibbard K.A., et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment // Nature. 2010. Vol. 463. P. 747–756.

Pozdnyakov S.P., Vasilevskiy P.Y., Grinevskiy S.O. Estimation of groundwater recharge by flow in vadose zone simulation at the watershed with different landscapes and soil profiles // Engineer. Geol. and Hydrogeol. Bulgarian academy of Sciences. 2015. N 29. P. 47–58.

Samartsev V.N., Chiganov I.A., Grinevskiy S.O. et al. Assessing the effect of climate change in the 21st century on groundwater balance in the southwestern Crimea // Water Resources. 2024. Vol. 51, no. 6. P. 938–950.

Schaap M.G., Leij F.L., van Genuchten M.Th. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions // J. Hydrology. 2001. Vol. 251. P. 163–176.

Semenov M.A., Stratonovitch P. Adapting wheat ideotypes for climate change: accounting for uncertainties in CMIP5 climate projections // Climate Research, 2015. Vol. 65. P. 123–139.

Šimůnek J., Šejna M., Saito H., et al. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media. Ver. 4.08 // Prepr. Depart. of Environ. Sci. University of California Riverside. California, Riverside, 2009. 296 p.

Taylor K., Stouffer R., Meehl G. An overview of CMIP5 and the experiment design // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2015. N 93. P. 485–498.

Статья поступила в редакцию 04.10.2025,
одобрена после рецензирования 12.11.2025,
принята к публикации 24.04.2026