

УДК 556.3

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-6-152-162

МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ФОРМИРОВАНИЕ ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ И РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В МАСШТАБЕ МАЛОГО РЕЧНОГО БАСЕЙНА

Сергей Олегович Гринеvский¹✉, Александра Евгеньевна Преображенская², Василий Витальевич Халеский³

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

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; shur-gmur22@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; vasya250300@gmail.com

Аннотация. В статье на основе геогидрологического моделирования формирования инфильтрационного питания и ресурсов подземных вод проведен анализ их современных и прогнозных климатических изменений на примере бассейна р. Ваймуга Архангельской области. Получено, что ландшафтные различия климатической изменчивости инфильтрационного питания существенны даже на площади малых речных бассейнов, а масштабы и направленность его прогнозного изменения на основе глобальных климатических моделей значительно различаются. При этом прогнозные изменения климата практически не оказывают влияния на формирование баланса эксплуатации подземных вод, однако проявляются в степени ее воздействия на речной сток.

Ключевые слова: изменение климата, ресурсы подземных вод, инфильтрационное питание, моделирование

Для цитирования: Гринеvский С.О., Преображенская А.Е., Халеский В.В. Модельный анализ влияния изменения климата на формирование инфильтрационного питания и ресурсов подземных вод в масштабе малого речного бассейна // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 6. С. 152–162.

MODEL ANALYSIS OF THE CLIMATE CHANGE IMPACT ON THE GROUNDWATER RECHARGE AND RESOURCES ON THE SCALE OF A SMALL RIVER BASIN

Sergey O. Grinevskiy¹✉, Aleksandra E. Preobrazhenskaya², Vasiliy V. Khaleskiy³

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

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; shur-gmur22@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; vasya250300@gmail.com

Abstract. In the article, based on geohydrological modeling of the groundwater recharge and resources, an analysis of their current and predicted climate changes was carried out using the example of the Vaimuga river basin, Arkhangelsk region. It was found, that landscape differences in climatic variability of groundwater recharge are significant even over the area of small river basins, and the scale and direction of its predicted changes based on global climate models differ significantly. At the same time, predicted climate changes do not have a significant impact on the groundwater exploitation, but are manifested in the degree of its impact on river flow.

Keywords: climate change, groundwater recharge, groundwater resources, modelling

For citation: Grinevskiy S.O., Preobrazhenskaya A.E., Khaleskiy V.V. Model analysis of the climate change impact on the groundwater recharge and resources on the scale of a small river basin. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 6: 152–162. (In Russ.).

Введение. Изучение влияния наблюдаемых и прогнозных климатических изменений на процессы формирования ресурсов подземных и поверхностных вод является актуальным научным направлением, широко представленным во многих российских и зарубежных публикациях, обзор которых приведен в [Фролова и др., 2022; Kuang et al., 2024]. Согласно региональным обобщениям для территории России, наблюдаемый в современный период рост температур и осадков для большинства регионов проявляется в преимущественном уве-

личении годового и минимального речного стока при тенденции к деградации пика половодья. Такие климатические трансформации речного стока во многом обусловлены соответствующими изменениями его подземной составляющей. Исследования процессов формирования инфильтрационного питания (ИП) подземных вод под влиянием наблюдаемых климатических изменений на региональном уровне показали, что, несмотря на рост температур воздуха в современный период, на большей части территории Европейской части России среднегодовое

ИП увеличилось. При этом наиболее значимый рост ИП (до 50–60 мм/год) происходит на севере региона — в зоне избыточного увлажнения, где его увеличение обусловлено, главным образом, зимним впитыванием влаги в периоды оттепелей [Grinevskiy et al., 2021].

Климатические изменения ИП напрямую определяют условия восполнения ресурсов подземных вод в зоне интенсивного водообмена и наиболее ярко должны проявляться в масштабе малых речных бассейнов с благоприятными условиями питания и хорошей дренированностью гидрогеологического разреза. В таких условиях процессы формирования ИП и ресурсов подземных вод наиболее чувствительны к современным изменениям климата и его различным прогнозным сценариям. Это обусловило выбор объекта исследований — территорию бассейна р. Ваймуга Архангельской области, на примере которого методами геогеологического моделирования проведен анализ современных и прогнозных климатических изменений ИП и ресурсов подземных вод.

Характеристика объекта исследований.

Бассейн р. Ваймуга расположен в 80 км к югу от г. Архангельска. Объектом исследований являются верховья бассейна площадью 1260 км² — это слабо урбанизированная территория с практически неизменными природными ландшафтами и ненарушенными условиями формирования подземного и речного стока (рис. 1).

В региональном плане эта территория относится к краевой области питания Северо-Двинского артезианского бассейна. Гидрогеологический разрез представлен высокопроницаемыми сильнозакарстованными известняками и доломитами средне-верхнекаменноугольного возраста мощностью, в среднем, 40–50 м, которые на большей части рассматриваемого бассейна р. Ваймуга залегают практически с поверхности или перекрыты маломощным покровом четвертичных отложений ледникового, аллювиального и болотного генезиса. Карбонатные водоносные отложения подстилаются относительно слабопроницаемым комплексом нижнекаменноугольных терригенных пород [Filimonova, et al., 2015].

Речная сеть представлена р. Ваймугой и ее притоками, формирование стока которых полностью происходит в границах рассматриваемой территории (рис. 1). Реки относятся к разряду малых, с узкими долинами и невыработанным профилем, на многих участках врезанным непосредственно в коренные породы.

Условия залегания, высокая проницаемость пород и интенсивно развитый поверхностный карст обуславливают весьма благоприятные условия инфильтрационного питания карбонатного водоносного комплекса, в котором формируются крупнодебитные локальные потоки подземных вод, направленные от местных водоразделов к речным долинам. Сильная закарстованность карбонатных отложений и ограниченное развитие аллювия определяют тес-

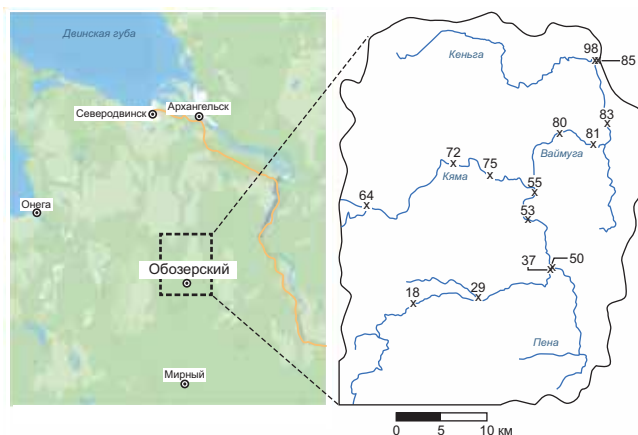


Рис. 1. Территория исследований — верховья бассейна р. Ваймуга с расположением опорных гидрометрических створов

ную гидравлическую связь подземных и речных вод и их активное взаимодействие, выражающееся в разнообразных формах — рассредоточенной и очаговой субаквальной и родниковой разгрузки, а также рассредоточенного (линейного) и концентрированного (через карстовые поноры) руслового поглощения [Гринеvский, Штенгелов, 1988].

На данной территории в начале 1980-х годов проведена разведка и оценка запасов Пермилковского месторождения подземных вод для водоснабжения г. Архангельска в количестве 261 тыс. м³/сут (по категориям А+В), однако месторождение до сих пор не эксплуатируется. В балансовом отношении запасы этого месторождения приречного типа [Боревский и др., 1989] полностью обеспечены естественными ресурсами средне-верхнекаменноугольного водоносного комплекса, формирующимися в верховьях бассейна р. Ваймуга, а также привлечением речных вод. По результатам прогнозных расчетов, проведенных на этапе оценки запасов месторождения, эксплуатация месторождения вызовет значительное сокращение речного стока р. Ваймуга, вплоть до его полного перехвата в меженный период на отдельных участках [Гринеvский 1991; 2012].

Таким образом, в рассматриваемом бассейне верховьев р. Ваймуга формирование подземного и речного стока в их тесном взаимодействии напрямую связано с процессами инфильтрационного питания подземных вод, которые определяются ландшафтно-климатическими факторами. Основной целью исследований являются оценка и анализ влияния наблюдаемых и прогнозных климатических изменений на формирование ИП и ресурсов подземных вод, в том числе и при их проектной эксплуатации.

Методика проведения исследований. Исследования климатических изменений ИП и ресурсов подземных вод проведены на основе геогеологического моделирования, которое объединяет модели формирования ИП при разных климатических условиях и модель подземного и речного стока в границах бассейна, построенную по материалам

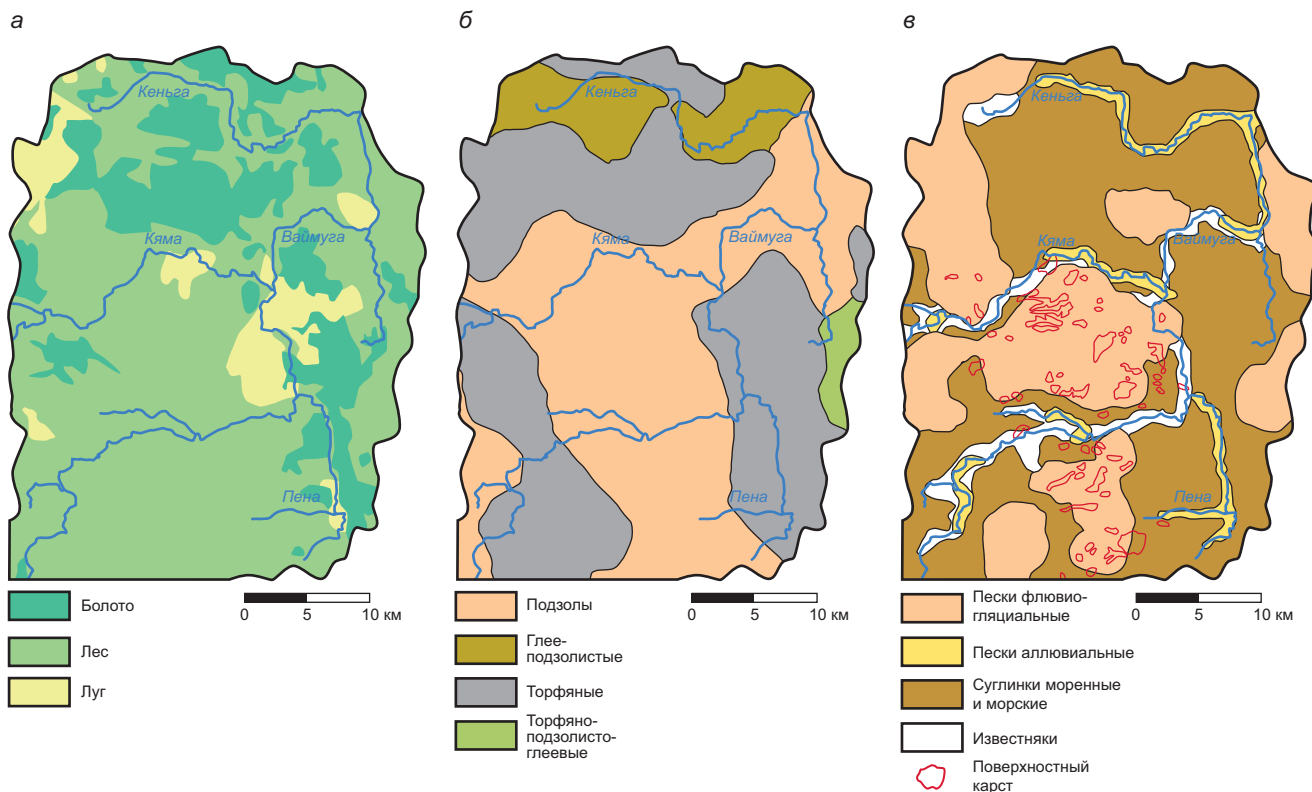


Рис. 2. Схемы районирования территории по характеру растительности (а), типу почвы (б) и породам зоны аэрации (в)

разведочных работ при оценке запасов Пермилковского месторождения.

Для построения модели ИП проведено районирование территории по основным факторам, определяющим различия природных условий его формирования — характеру растительного и почвенного покрова и составу пород зоны аэрации (рис. 2). Далее для каждого типа условий, отличающегося определенным сочетанием выделенных факторов, проведено моделирование ИП.

Модель формирования ИП состоит из 2-х блоков. В первом блоке, на основе программы SurfBal, разработанной на кафедре гидрогеологии МГУ, моделируются процессы трансформации осадков

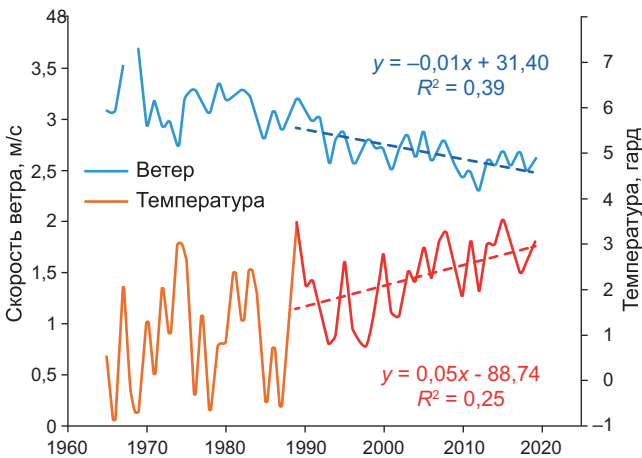


Рис. 3. Среднегодовые значения температуры воздуха и скорости ветра за 1965–2019 гг. с линейными трендами в период 1989–2019 гг. на примере метеостанции Онега

на поверхности земли, включая их перехват растительностью и испарение с нее, образование поверхностного стока и впитывания влаги в почву с учетом накопления и таяния снега, а также промерзания-оттаивания почвы [Гриневский, Поздняков, 2010; Pozdniakov et. al., 2015]. Полученные в результате моделирования суточные величины впитывания влаги и потенциальной эвапотранспирации, характеризующей теплоэнергетический потенциал поверхности, определяют условие на верхней границе второго модельного блока, в котором моделируется одномерный нестационарный влагоперенос в зоне аэрации с учетом испарения и отбора влаги корнями растений на основе программы HYDRUS-1D [Šimůnek, et al., 2009]. При этом расчетные значения потока влаги на нижней границе модели влагопереноса, которой является уровень грунтовых вод, характеризуют инфильтрационное питание.

Моделирование современных условий формирования ИП проводится на основе многолетних суточных рядов метеорологических характеристик (осадки, температура и влажность воздуха, средняя скорость ветра) по метеостанции Онега за период 1965–2019 гг. Данная станция расположена на одной широте с объектом исследования и характеризуется наиболее полным набором необходимых для моделирования метеорологических данных. Их анализ показывает статистически значимые тренды увеличения температуры воздуха и уменьшения средней скорости ветра, начиная с конца 1980-х годов (рис. 3), при менее выраженных трендах увеличения осадков и изменения влажности. Такие же

Таблица 1

Изменения среднегодовых значений метеорологических характеристик за период 1989–2019 гг. по сравнению с 1965–1988 гг. по метеостанциям Архангельск, Онега и Няндома

Метеостанция	Изменения среднегодовых значений за 1989–2019 гг.			
	осадки, мм/год	температура воздуха, °С	влажность воздуха, %	скорость ветра, м/с
Архангельск	83	1.36	1.0	-0.8
Онега	44	1.40	0.2	-0.7
Няндома	67	1.32	0.3	-0.5

тенденции прослеживаются и по другим ближайшим метеостанциям (табл. 1). Таким образом, для оценки влияния современных климатических изменений ИП отдельно рассматриваются 2 периода — относительно стабильный ретроспективный (1965–1988) и современный климатически нестационарный (1989–2019).

В качестве прогнозных моделируются два типа климатических сценариев: краткосрочный (на середину XXI века) построен из предпосылки сохранения наблюдаемых с 1980-х годов статистически значимых многолетних трендов изменения среднемесячных метеорологических характеристик; долгосрочный (на конец XXI века) основан на глобальных моделях общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) 5-й фазы международного проекта сравнения объединенных моделей (CMIP5).

Для моделирования ИП использованы гидрофизические параметры почвы и пород зоны аэрации, полученные по результатам лабораторных определений на образцах, отобранных в шурфах в ходе экспедиционных работ 2021 г., и дополненные характеристиками соответствующих типов почв из базы данных БД Soil Почвенного института им. В.В. Докучаева. Параметры расчетных модулей снегонакопления и промерзания почвы калибровались на основе сопоставления расчетной внутригодовой динамики высоты снежного покрова и глубины промерзания с фактическими данными.

По результатам моделирования для каждого выделенного типа ландшафта на основе суточных величин рассчитывается среднегодовой водный баланс на поверхности земли и в зоне аэрации, а также величины ИП за периоды ретроспективного относительно стабильного (1965–1988), современного меняющегося (1989–2018) и прогнозного климата. Рассчитанные таким образом среднегодовые величины ИП распространяются на всю площадь соответствующего типа ландшафта, представляются в виде картограмм, характеризующих его ландшафтную неоднородность в границах бассейна за разные климатические периоды, и определяют условие на верхней границе геогидрологической модели рассматриваемой территории. При этом в рамках настоящего исследования принято, что ландшафты

территории под влиянием прогнозных климатических изменений не меняются.

Геогидрологическая модель бассейна р. Ваймуга разработана в программном комплексе PMWin 8 с расчетным модулем ModFlow 2000 [Harbaugh, et al., 2000] на основе архивных материалов разведки Пермилковского месторождения подземных вод (1980–1985). Ее принципиальное отличие в рамках настоящих исследований заключается в полномасштабном моделировании процессов формирования подземного и речного стока на основе сопряжения геофильтрационной модели и ландшафтно-гидрогеологических моделей условий формирования водного баланса и ИП. Модель построена в границах водосборной площади бассейна, которая рассматривается как непроницаемая. Модельный гидрогеологический разрез включает четвертичные (1-й слой) и карбонатные каменноугольные отложения, представленные тремя модельными слоями, отражающими их различную трещиноватость и закарстованность [Гриневский, Короткова, 1997]. Нижняя граница рассматриваемого разреза проведена по кровле нижнекаменноугольных терригенных слабопроницаемых отложений. Речная сеть бассейна реализована границами 3-го рода с условием гидрогеодинамически зависимого гидрологического режима водотоков [Гриневский, 2012] на основе использования пакета STR, позволяющего моделировать реакцию речного стока на изменение подземного питания.

На основе геогидрологической модели и различных карт среднегодового ИП, отражающих ретроспективные, современные и прогнозные климатические условия, проведено моделирование формирования ресурсов подземных вод в ненарушенных условиях и при проектной эксплуатации подземных вод.

Результаты исследований и их обсуждение.
Анализ влияния современных климатических изменений. На первом этапе по результатам моделирования ИП рассчитывались его среднегодовые значения за период 1965–1988 гг., отвечающие ретроспективным относительно стабильным климатическим условиям, по которым осуществлялась калибровка расчетных моделей. В процессе калибровки для отдельных ландшафтов корректировались параметры поверхностного стокообразования на основе сопоставления суммарного расчетного расхода инфильтрационного питания на площади частных водосборных бассейнов территории и среднегодовых меженных расходов рек, рассчитанных по фактическим данным периода разведки Пермилковского месторождения (80-е годы). По результатам калибровки суммарный среднегодовой расход инфильтрационного питания на площади бассейна 4,75 м³/с соответствует суммарному среднемеженному расходу на замыкающих створах рек Ваймуга (№ 85) и Кеньга (№ 98) (рис. 1). При этом отмечается различие суммарного питания на площади отдельных частных

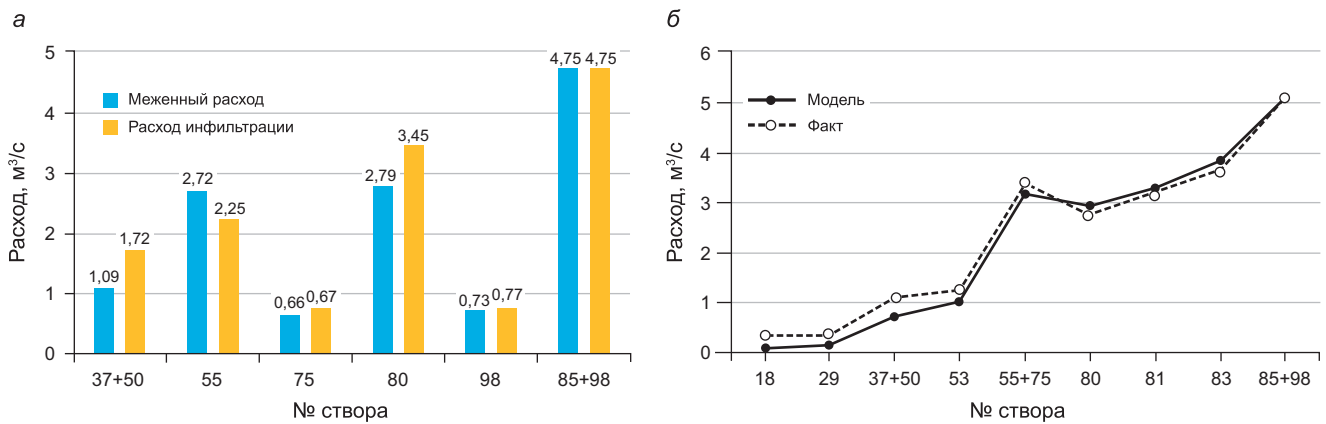


Рис. 4. Сопоставление для ретроспективного климатического периода (1965–1988): а — среднемеженного расхода рек и суммарного расчетного расхода инфильтрации на площади частных водосборных бассейнов; б — модельного и фактического расхода реки Ваймуга

водосборов и меженного расхода реки (рис. 4, а), что для данного бассейна вполне закономерно, поскольку в условиях интенсивной закарстованности пород происходит перераспределение подземного стока между отдельными водосборными площадями.

Также по результатам моделирования ретроспективного климатического периода была дополнительно откалибрована геогидрологическая модель рассматриваемого бассейна и проведена корректировка площадного распределения проводимости карбонатных отложений на основе сопоставления модельных и фактических величин разгрузки подземных вод и меженных расходов рек (рис. 4, б).

Результаты моделирования ИП для различных сочетаний ландшафтных условий, выделенных согласно проведенному районированию территории (рис. 2), показали существенное различие среднеемноголетних величин ИП, которые варьируют от 50 до 300 мм/год, составляя 8–49% от нормы осадков. Минимальные значения характерны для лугового ландшафта с глее-подзолистыми и торфяно-глее-подзолистыми почвами и суглинистым составом пород зоны аэрации, максимальные — для территории, где зона аэрации представлена известняками, а также на локальных участках карстовых форм рельефа. В последнем случае при моделировании было принято, что в карстовых понижениях поверхностный сток отсутствует, и все осадки за вычетом суммарной эвапотранспирации формируют ИП.

Генерализация пространственной неоднородности среднеемноголетнего ИП проведена на основе выделения зон с дискретностью 20–50 мм/год (рис. 5), характеризующихся средневзвешенными по площади величинами среднеемноголетней инфильтрации:

$$W_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^N W_i f_i}{\sum_{i=1}^N f_i}, \quad (1)$$

где N — количество районов площадью f_i с величинами ИП данного диапазона W_i .

Среднее значение среднеемноголетнего ИП на рассматриваемой территории, отвечающее ретроспективным климатическим условиям 1965–1988 гг., составляет 119 мм/год и формирует ресурсы подземных вод в количестве 410,7 тыс. м³/сут.

Далее, аналогичным образом, используя расчетные среднеемноголетние величины ИП за период 1989–2019 гг., была построена карта питания, отвечающая современным климатическим условиям, согласно которой на рассматриваемой территории произошло относительно равномерное незначительное увеличение ИП. В среднем на площади бассейна р. Ваймуга среднеемноголетнее ИП в современный период увеличилось до 129 мм/год — на 10 мм/год по сравнению с ретроспективным периодом, что составляет 23% от роста осадков (табл. 1). Это вызвало соответствующее увеличение ресурсов подземных вод, формирующихся на данной территории, до 445,6 тыс. м³/сут. Детальный анализ результатов

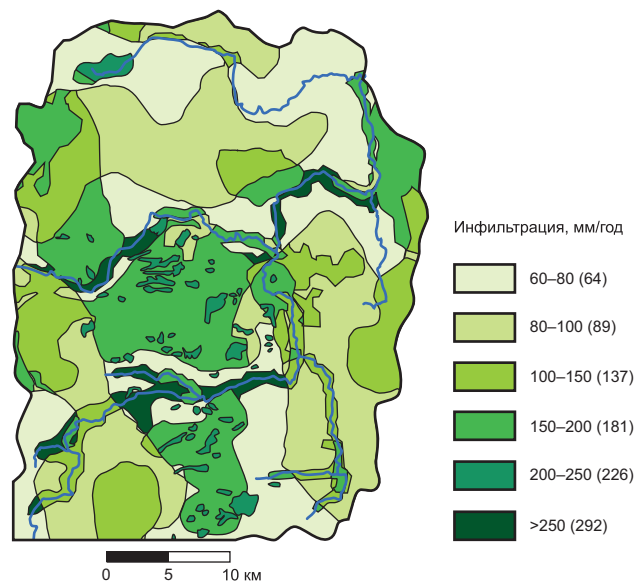


Рис. 5. Карта среднеемноголетнего инфильтрационного питания подземных вод бассейна р. Ваймуга на ретроспективный климатический период 1965–1988 гг.

Таблица 2

Среднегодовое значения климатических характеристик и инфильтрационного питания, а также их изменения в современный (1989–2019) и прогнозный (2020–2051) периоды

Характеристика	Периоды				
	1965–1988	1989–2019	Изменение	2020–2050	Изменение
Осадки, мм/год	587	631	+44	682	+51
Температура, град	0,95	2,27	+1,32	3,00	+0,74
Скорость ветра, м/с	3,20	2,69	-0,51	2,47	-0,22
Коэффициент увлажнения	1,25	1,31	+0,06	1,38	+0,07
Инфильтрация, мм/год	119	129	+10	168	+39
Коэффициент инфильтрации, %	20,3	20,4	+0,01	24,6	+4,2

моделирования водного баланса показал, что такое увеличение ИП и ресурсов подземных вод, несмотря на существенный рост температуры воздуха (рис. 3, табл. 1), объясняется увеличением коэффициента увлажнения (отношения нормы осадков к потенциальной эвапотранспирации): с 1,25 в ретроспективный период, до 1,31 — в современный. Это, в свою очередь, связано с тем, что наблюдаемый рост температуры воздуха происходит на фоне снижения скорости ветра (рис. 3, табл. 1) и не приводит к существенному росту испарительных и транспирационных процессов, что отмечалось и по результатам региональных исследований [Grinevskiy et al, 2021].

Влияние прогнозных климатических изменений. Краткосрочный климатический прогноз построен из предпосылки сохранения до середины XXI века наблюдаемых за период 1989–2019 гг. статистически значимых трендов изменения метеорологических характеристик. В этом случае исходные ряды суточных метеоданных 1989–2019 гг. экстраполированы до 2050 г. с сохранением линейных трендов на среднемесечном уровне. Полученные таким образом прогнозные изменения среднегодовых климатических характеристик в сопоставлении с современными и ретроспективными периодами приведены в табл. 2. Результаты моделирования формирования ИП на основе прогнозных рядов метеоданных показывают, что при таком климатическом сценарии происходит дальнейший рост коэффициента увлажнения территории до 1,38 и, как следствие — среднегодового ИП, в среднем для территории до 168 мм/год и ресурсов подземных вод — до 581,5 тыс. м³/сут. При этом, согласно рассмотренному климатическому сценарию, увеличение среднегодового ИП, а также коэффициента инфильтрации (доли ИП от осадков) в прогнозный период 2020–2050 гг. больше, чем в современный 1989–2019 гг. Это связано с более интенсивным ростом коэффициента увлажнения за счет большего увеличения среднегодовых осадков по сравнению

Таблица 3

Сопоставление прогнозных среднегодовых климатических характеристик и их изменений (Δ) на конец XXI века по 19 моделям семейства СМIP5 по сравнению с современными (BASE_1989–2019 гг.)

Модель климата	Температура T, °C		Осадки, O, мм/год		Потенциальная эвапотранспирация ET ₀ , мм/год		Коэффициент увлажнения K	
	T	ΔT	O	ΔO	ET ₀	ΔET ₀	K	K/ K _{base}
	BASE_1989–2019	2,33	0	631	0	381	0	1,66
ACCESS1-3	7,67	5,34	788	157	480	99	1,64	0,991
BCC-CSM1-1	7,66	5,33	752	121	461	80	1,63	0,985
CanESM2	9,41	7,08	760	129	484	103	1,57	0,948
CMCC-CM	9,56	7,23	895	264	442	61	2,02	1,223
CNRM-CM5	7,62	5,29	693	62	461	80	1,50	0,908
CSIRO-MK36	7,66	5,33	800	169	444	63	1,80	1,088
EC-EARTH	7,24	4,91	726	95	463	82	1,57	0,947
GFDL-CM3	10,35	8,02	908	277	544	163	1,67	1,008
GISS-E2-R-CC	7,45	5,12	782	151	443	62	1,77	1,066
HadGEM2-ES	9,35	7,02	699	68	497	116	1,41	0,849
INMCM4	6,76	4,43	742	111	437	56	1,70	1,025
IPSL-CM5A-MR	9,47	7,14	851	220	497	116	1,71	1,034
MIROC5	9,46	7,13	684	53	512	131	1,34	0,807
MIROC-ESM	11,12	8,79	824	193	537	156	1,53	0,927
MPI-ESM-MR	6,76	4,43	734	103	412	31	1,78	1,076
MRI-CGCM3	7,73	5,40	876	245	431	50	2,03	1,227
NCAR-CCSM4	7,47	5,14	739	108	458	77	1,61	0,974
NCAR-CESM1-CAM5	7,78	5,45	710	79	492	111	1,44	0,871
NorESM1-M	7,68	5,35	680	49	488	107	1,39	0,841

с ростом температуры воздуха в прогнозный период (табл. 2). При этом прогнозируемое увеличение среднегодового ИП на 39 мм/год составляет уже 76% от роста осадков (на 51 мм/год), что существенно больше, чем в современный период, и связано с опережающим увеличением осадков по сравнению с суммарной эвапотранспирацией.

Долгосрочные климатические сценарии на конец XXI века основаны на 19-ти МОЦАО ансамбля СМIP5 при экстремальном сценарии эмиссии парниковых газов RCP8.5 [Semenov, Stratonovitch, 2015]. Адаптация глобальных МОЦАО для рассматриваемой территории проведена на основе стохастического генератора метеорядов суточного разрешения LARSWG 6.0 [Semenov, Stratonovitch, 2010], который формирует прогнозные временные ряды осадков, минимальной, максимальной температуры воздуха и солнечной радиации, статистически подобные фактическим данным на конкретной метеостанции. Далее, используя базу данных МОЦАО, в расчетные ряды вносятся прогнозные изменения, которые ожидаются в XXI веке согласно разным моделям из семейства СМIP5.

Таблица 4

**Сопоставление прогнозных изменений
среднеголетнего ИП и естественных ресурсов
подземных вод на конец XXI века по трем климатическим
моделям по сравнению с современными условиями**

Модель климата	Инфильтрационное питание W , мм/год			Естественные ресурсы, тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$	
	W	ΔW		EP	ΔEP
		среднее	диапазон		
современная BASE_1989–2019	129	0	0	445,6	0
«сухая» MIROC5	103	-26	(-1)–(-132)	354,0	-91,6
«влажная» MRI-CGCM3	269	140	1–243	928,7	483,1
«средняя» BCC-CSM1-1	157	28	(-68)–101	540,6	95,0

Используя такой подход и фактические метеоданные по станции Онега за 1989–2019 гг., получены прогнозные метеорологические ряды на конец XXI века согласно 19-ти различным климатическим моделям. Их анализ показывает, что по всем моделям прогнозируется рост среднегодовой температуры и количества осадков, однако их относительные изменения существенно различаются — увеличение температуры ΔT варьирует от 4,4 °C до 8,8 °C, осадков ΔO — от 49 мм/год до 277 мм/год (табл. 3). Такие «разнонаправленные» с точки зрения процессов формирования водного баланса климатические сценарии приводят к различным относительным изменениям коэффициента увлажнения по сравнению с современными условиями. Как следует из рис. 6, прогнозные модели разделились на 2 практически равные группы, согласно которым ожидается либо уменьшение коэффициента увлажнения, либо его увеличение.

Для дальнейших исследований были выбраны 3 «контрастных» прогнозных сценария, согласно которым в конце XXI века возможны максимальное уменьшение коэффициента увлажнения («сухая»), его максимальное увеличение («влажная») и среднее изменение («средняя») (табл. 3, рис. 6). По результатам моделирования формирования ИП на основе этих климатических сценариев проведено сопоставление прогнозных и современных среднегодовых значений ИП на различных ландшафтах территории бассейна (табл. 4).

Согласно «сухой» климатической модели (рис. 7, а) ожидается уменьшение среднегодовой инфильтрации в среднем на 26 мм/год, при этом ландшафтные различия сокращения питания варьируют от 1 мм/год до 132 мм/год.

Наиболее «влажный» климатический сценарий (рис. 7, б) приводит к существенному увеличению среднегодовой инфильтрации в среднем на 140 мм/год, что составляет 57% от прогнозируемого согласно данной модели роста осадков. Ландшафтные различия изменения питания варьируют от 1

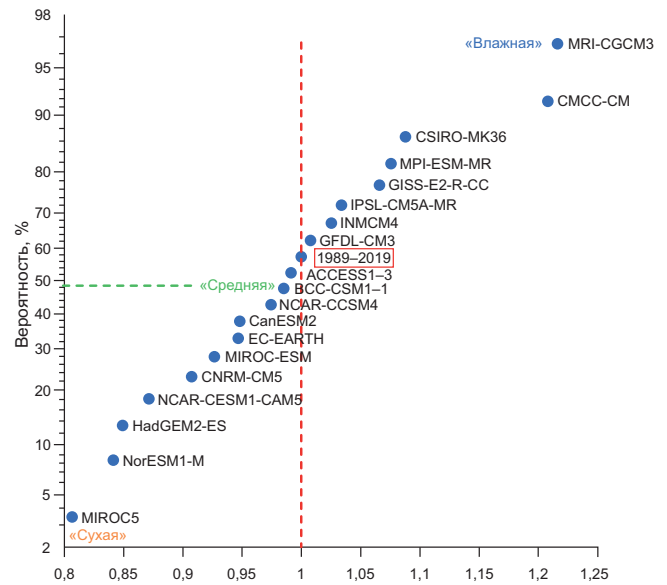


Рис. 6. Вероятностная кривая относительного изменения коэффициента увлажнения по 19-ти климатическим моделям по сравнению с современными условиями

до 243 мм/год, при этом максимальные значения, составляющие практически 100% от роста осадков, соответствуют участкам открытого поверхностного карста.

Согласно «среднему» климатическому сценарию направленность прогнозных изменений среднегодовой инфильтрации еще более неоднозначна: на одних ландшафтах ожидается ее уменьшение, а на других — увеличение (рис. 7, в). При этом, несмотря на некоторое уменьшение коэффициента увлажнения в этой модели, в среднем на площади бассейна прогнозируется увеличение среднегодовой инфильтрации на 28 мм/год, что составляет 23% от роста осадков.

Высокие ландшафтные различия прогнозных изменений среднегодового ИП (табл. 4, рис. 7) обусловлены нелинейностью климатических преобразований составляющих водного баланса на поверхности земли и в зоне аэрации. При этом прослеживается определяющая роль растительного покрова. Максимальное сокращение инфильтрационного питания в «сухом» климатическом сценарии характерно для открытых луговых ландшафтов, а минимальное — для закрытых лесных. «Влажный» сценарий показывает обратную закономерность: максимальный рост среднегодовой инфильтрации наблюдается на лесном, а минимальный — на луговом ландшафте. Эти тенденции четко проявляются и при «среднем» климатическом сценарии, согласно которому сокращение ИП прослеживается преимущественно на луговых ландшафтах, а ее увеличение — на лесных (табл. 5). Таким образом, водный баланс ландшафтов по-разному реагирует на климатические изменения: открытые луговые ландшафты наиболее чувствительны к прогнозируемому росту температуры и испаряемости, а на закрытых лесных в большей степени проявляется увеличение

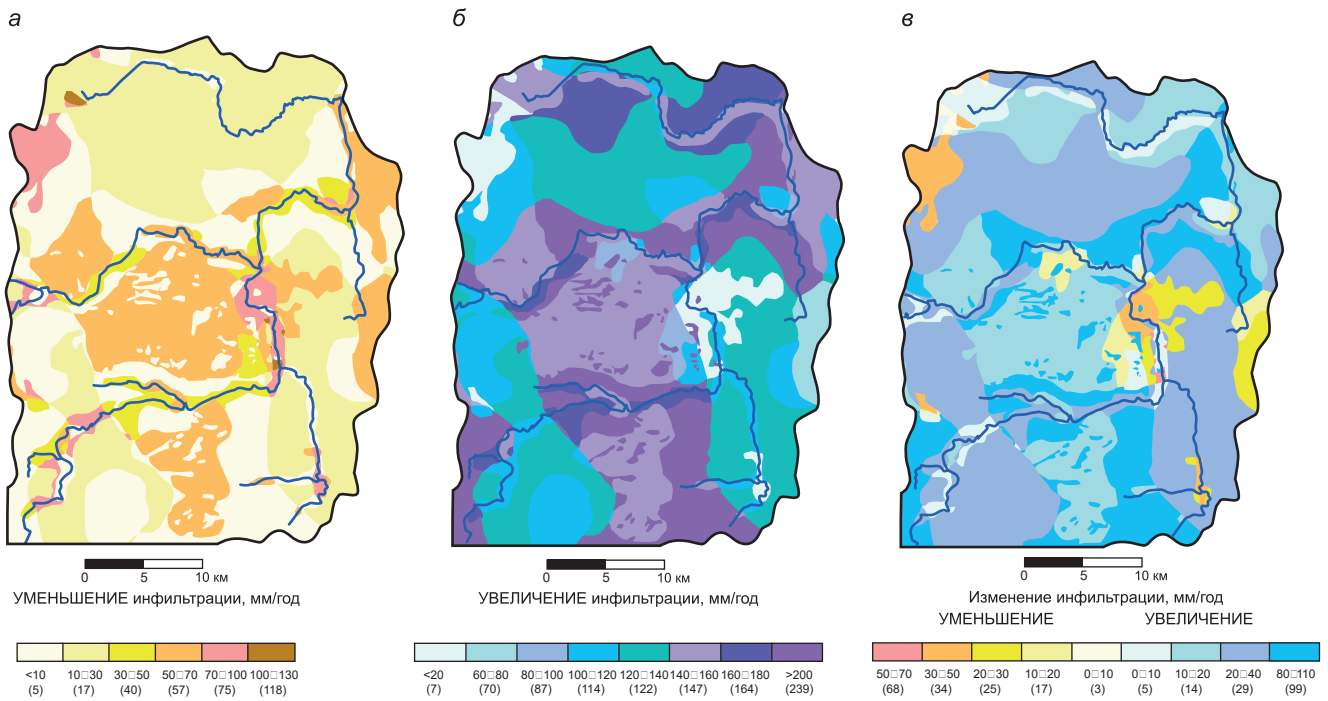


Рис. 7. Карты изменения среднемноголетней инфильтрации в бассейне р. Ваймуга на конец XXI века согласно прогнозным климатическим сценариям: а — «сухой» модели MIROC5; б — «влажной» модели MRI-CGCM3; в — «средней» модели BCC-CSM1-1. В скобках приведены средневзвешенные по площади зоны значения

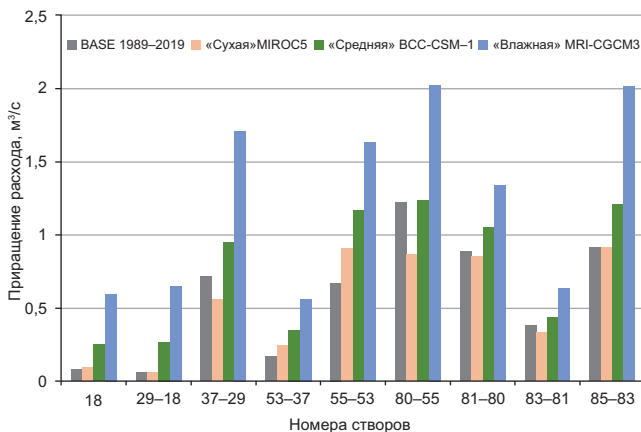


Рис. 8. Распределение подземного стока по частным водосборам бассейна р. Ваймуга в современных условиях и при различных моделях изменения климата

осадков. Этим объясняется, что для рассматриваемого бассейна р. Ваймуга, характеризующегося высокой лесистостью (92%), «средний» климатический сценарий, несмотря на незначительное уменьшение коэффициента увлажнения (табл. 4), приводит к увеличению средней инфильтрации.

Участки открытого поверхностного карста оказываются вообще «нечувствительными» к климатическим изменениям согласно «сухой» модели, однако являются локальными участками существенного увеличения ИП в других сценариях (табл. 5).

Различную ландшафтную «чувствительность» ИП к прогнозным климатическим изменениям подтверждают результаты моделирования формирования подземного стока на геогидрологической модели бассейна р. Ваймуга при среднемноголетнем

Таблица 5

Климатические изменения среднемноголетнего ИП подземных вод на различных ландшафтах территории при различных прогнозных сценариях

Модель климата	Изменение инфильтрации ΔW , мм/год			
	лес	луг	поверхностный карст	среднее
«сухая» MIROC5	-24	-63	-1	-26
«влажная» MRI-CGCM3	153	38	213	140
«средняя» BCC-CSM1-1	36	-23	88	28

ИП согласно 3-м климатическим сценариям. Как следует из рис. 8, разные сценарии прогнозного климата вызывают несколько различное перераспределение подземного стока между отдельными участками бассейна. При этом суммарные естественные ресурсы подземных вод, формирующиеся в границах бассейна р. Ваймуга сокращаются на 20% в «сухом» климатическом сценарии и увеличиваются на 21% в «среднем» и более чем в 2 раза — во «влажном» сценариях (табл. 4).

Анализ проектной эксплуатации подземных вод при различных сценариях прогнозных климатических изменений. На завершающем этапе исследований был проведен анализ работы проектного водозабора в размере утвержденных запасов Пермилковского месторождения в количестве 261 тыс. м³/сут. Прогнозное моделирование водоотбора на двух участках в долине р. Ваймуга проведено при различных климатических условиях формирования

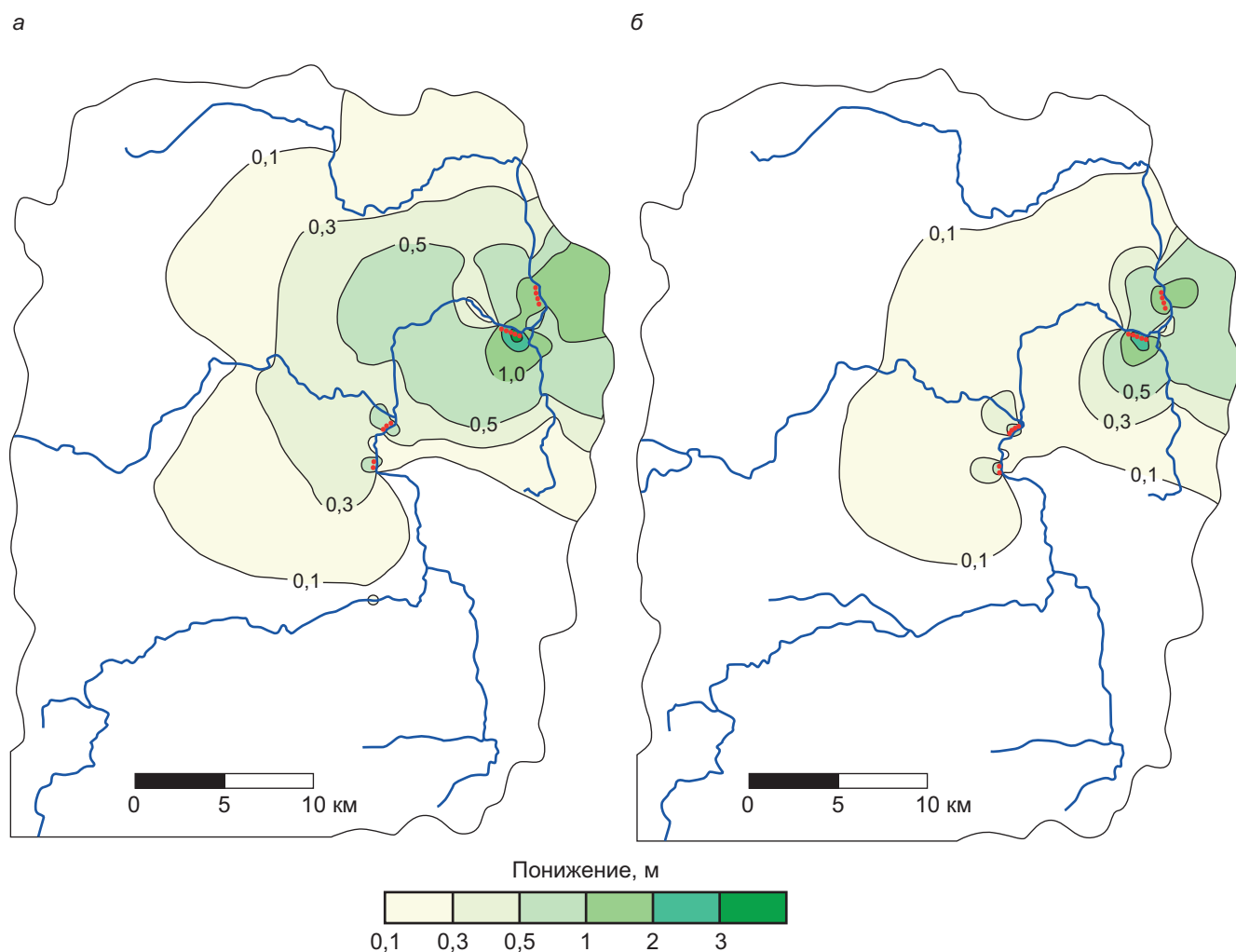


Рис. 9. Изолинии понижения уровня подземных вод при работе проектного водозабора при «сухом» (а) и «влажном» (б) климатических сценариях

ресурсов подземных вод — современных и при двух наиболее экстремальных вариантах прогнозных сценариев на конец XXI века — «сухом» и «влажном».

Результаты моделирования показали, что, несмотря на существенное отличие прогнозных климатических условий от современных, они не приводят к существенному изменению условий формирования эксплуатационных запасов месторождения. Среднегодовое стационарное водозабора обеспечивается естественными ресурсами (55–59%) и привлечением (фильтрацией) из р. Ваймуга (45–41%) — лишь незначительно меняется их долевое соотношение. Такая стабильность балансовой структуры водозабора определяется гидрогеодинамическими процессами фильтрации из реки, которые при достаточности стока не зависят от климатических условий. В этом случае уменьшение ИП и естественных ресурсов в «сухом» климатическом сценарии вызывают расширение гидрогеодинамической зоны влияния проектного водозабора, при которой инверсия (перехват) «необходимого» количества ресурсов происходит с большей площади бассейна (рис. 9).

Гораздо более существенно прогнозные изменения климатических условий влияют на степень воздействия водозабора на речной сток. Абсолютная величина сокращения речного стока остается постоянной и равной дебиту эксплуатации, однако относительная величина уменьшения стока по сравнению с естественными условиями существенно различается (рис. 10). При наиболее засушливом климатическом сценарии степень нарушения расхода реки на верхнем водозаборном участке возрастает до 100% (рис. 10, б), что означает полный локальный перехват стока и является критическим. Однако, «влажный» сценарий показывает более чем двукратное уменьшение ущерба стоку по сравнению с современными климатическими условиями, что связано с увеличением естественного межennaleго расхода реки (рис. 10, а).

Выводы и заключение. Таким образом, по результатам проведенных исследований влияния современных и прогнозных климатических изменений на условия формирования ИП и ресурсов подземных вод на примере бассейна р. Ваймуга можно сделать следующие основные выводы.

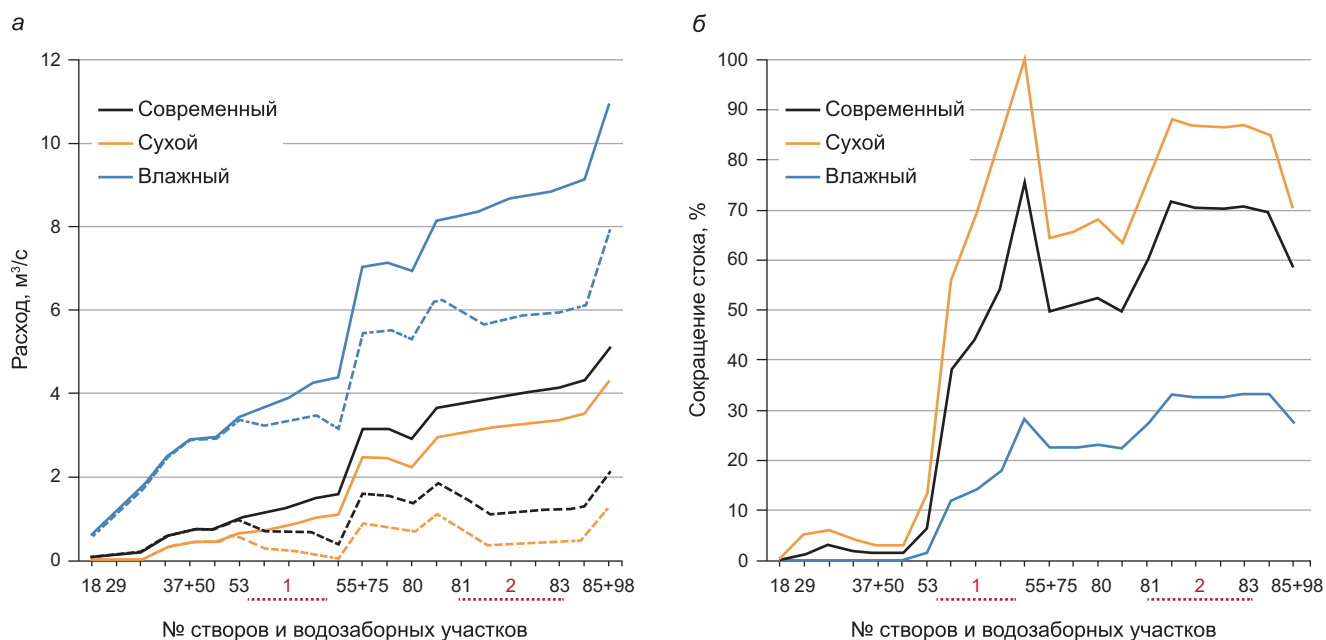


Рис. 10. Графики при современном и прогнозных климатических условиях: а — расхода р. Ваймуга в естественных условиях и при проектном водоотборе (пунктир); б — относительного сокращения стока р. Ваймуга при работе проектного водозабора

Наблюдаемый с конца 1980-х годов рост температуры и осадков проявился в увеличении общего коэффициента увлажнения, среднемноголетнего ИП и ресурсов подземных вод на рассматриваемой территории, которые будут и дальше возрастать при сохранении таких климатических тенденций до середины XXI века.

Ландшафтные различия климатической изменчивости ИП весьма существенны и проявляются даже на площади малых речных бассейнов с относительно однотипными условиями, что обусловлено нелинейностью климатической перестройки воднобалансовых процессов на поверхности земли и в зоне аэрации.

Направленность и масштабы влияния современных и прогнозных изменений климата на ИП и ресурсы подземных вод зависят, главным образом, от соотношения роста осадков и температуры воздуха, которые, в свою очередь, определяют тенденции изменения коэффициента увлажнения территории.

Долгосрочные климатические прогнозы на основе глобальных МОЦАО показывают большую вариативность возможных изменений метеорологических характеристик, и как следствие — прямо противоположные тенденции изменения коэффициента увлажнения, среднемноголетнего ИП и ресурсов подземных вод. Такая неопределенность современных глобальных климатических моделей затрудняет их использование для решения научно-прикладных задач на объектном уровне.

Проведенные исследования показали, что в условиях гумидного климата даже весьма контрастные и экстремальные сценарии его прогнозного изменения, не вызывают существенной перестройки балансовой структуры запасов приречных месторождений подземных вод и проявляются, главным образом, в незначительном перераспределении соотношения естественных и привлекаемых из реки ресурсов. С учетом предшествующих исследований [Гриневский и др., 2019] можно заключить, что формирование запасов подземных вод таких месторождений практически не подвержено климатическим изменениям. Однако, весьма существенно прогнозные климатические сценарии проявляются в масштабах воздействия эксплуатации подземных вод на речной сток, и в наиболее неблагоприятных «засушливых» прогнозах сокращение меженного стока реки на водозаборных участках может быть критическим.

Дальнейшие исследования в направлении анализа влияния глобальных климатических изменений на условия формирования ИП и ресурсов подземных вод должны быть направлены на совершенствование методов построения прогнозных моделей изменения климата в том числе и с учетом возможных преобразований природных ландшафтов.

Финансирование. Настоящая работа выполнена при поддержке грантов РНФ № 21-47-00008 (экспедиционные работы и разработка моделей) и № 24-17-00102 (прогнозное моделирование).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Боревский Б.В., Дробноход Н.И., Язвин Л.С. Оценка запасов подземных вод. Киев: Вища школа, 1989. 407 с.
- Гринеvский С.О. Гидрогеодинамическое моделирование взаимодействия подземных и поверхностных вод. М.: Инфра-М, 2012. 152 с.
- Гринеvский С.О. Формирование эксплуатационных запасов водозабора подземных вод в долине малой реки // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1991. № 3. С. 87–92.
- Гринеvский С.О., Короткова И.Ю. Обоснование допустимых понижений при оценке эксплуатационных запасов подземных вод // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1997. № 4. С. 71–74.
- Гринеvский С.О., Поздняков С.П. Принципы региональной оценки инфильтрационного питания подземных вод на основе геогидрологических моделей // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 5. С. 543–557.
- Гринеvский С.О., Спорышев В.С., Самарцев В.Н. Модельный анализ влияния климатических изменений на балансовую структуру эксплуатационных запасов приречного месторождения подземных вод // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2019. № 4. С. 45–54.
- Гринеvский С.О., Штенгелов Р.С. О прогнозировании влияния водозаборов подземных вод на сток малых рек // Водные ресурсы. 1988. № 4. С. 24–32.
- Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б. и др. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. 2022. Т. 49, № 3. С. 251–269.
- Grinevskiy S.O., Pozdniakov 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. 13, 428. <https://doi.org/10.3390/w13040428>
- Filimonova E., Baldenkov M. A combined-water-system approach for tackling water scarcity: application to the Permilovo groundwater basin, Russia // Hydrogeology Journal. 2015. Vol. 24, № 2. P. 489–502.
- Harbaugh A.W., Banta E.R., Hill M.C., McDonald M.G. MODFLOW-2000. The U.S. Geological Survey modular ground-water model. User guide to modularization concepts and the groundwater flow process // U. S. Geological Survey. 2000. Open-file report 00–92.
- Kuang X., Liu J., Scanlon B.R., et al. The changing nature of groundwater in the global water cycle // Science. 2024. 383, 962. <https://doi.org/10.1126/science.adf0630>
- Pozdniakov 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 // Engineering geology and Hydrogeology // Bulgarian academy of Sciences. 2015. № 29. P. 47–58.
- 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.
- Semenov M.A., Stratonovitch P. The use of multi-model ensembles from global climate models for impact assessments of climate change // Climate Research, 2010. Vol. 41. P. 1–14.
- 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.

Статья поступила в редакцию 22.05.2024,
одобрена после рецензирования 03.06.2024,
принята к публикации 25.01.2025