

УДК 556.3

С.П. Поздняков¹, С.О. Гриневский², Е.А. Дедюлина³, В.Н. Самарцев⁴

МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАБЛЮДАЕМЫХ И ПРОГНОЗНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В БАССЕЙНЕ МАЛОЙ РЕКИ

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», геологический факультет, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1

Moscow State University, Faculty of Geology, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

Проанализирована связь питания подземных вод в бассейне малой реки с текущими и ожидаемыми климатическими изменениями на европейской территории России на примере водосборного бассейна р. Жиздра (Калужская область) на основе моделирования процессов трансформации влаги на поверхности земли и влагопереноса в зоне аэрации. Для прогнозного моделирования питания во второй половине XXI в. применены результаты глобальных климатических прогнозов по 5 моделям общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) из семейства CM15 путем использования генератора прогнозных метеоусловий LARSWG5. Результаты моделирования показывают, что несмотря на то что все использованные МОЦАО прогнозируют потепление в исследуемом регионе на 2–6 °С, разница прогнозного питания еще существенно велика, что связано с различием прогнозируемого индекса сухости.

Ключевые слова: зона аэрации, моделирование, подземный сток, изменения климата, питание подземных вод.

The analysis of the connection of groundwater recharge in the basin of a small river with the current and expected climatic changes in the European territory of Russia is carried out using the catchment basin of Zhizdra river Kaluga region as an example. The analysis was based on the modeling of the processes of transformation of moisture on the earth surface and moisture transfer in the aeration zone. The results of global climate predictions for five models of the general circulation of the atmosphere and ocean (GCM) from the CM15 family were applied for the forecast in the second half of the 21st century using the LARSWG5 forecast weather conditions generator. The simulation results show that despite the fact that all the GCM used predict a warming in the region at 2–6 °C, the difference in the predicted recharge is still significantly large, which is associated with the difference in the predicted dryness index.

Key words: unsaturated zone, modeling, groundwater runoff, climate change, groundwater recharge.

Введение. Происходящие во второй половине XX и начале XXI в. климатические изменения — предмет интенсивных исследований в области водных ресурсов. Опубликовано большое количество работ, посвященных анализу того, как изменение климата влияет на речной сток. Подземные воды зоны интенсивного водообмена гумидных территорий, формирующие подземное питание рек, также подвержены воздействию климатических изменений за счет их влияния на процессы трансформации осадков на поверхности водосбора и в зоне аэрации. В условиях стабильного в многолетнем разрезе климата пространственно-временная неоднородность выпадения осадков и многолетние вариации внутригодового распределения

температуры воздуха приводят к внутригодовой и многолетней изменчивости питания и разгрузки подземных вод.

Накопленные в последние десятилетия статистически достоверные данные о трендах температуры воздуха и осадков дают основания для поиска изменений в режиме и балансе подземных вод зоны интенсивного водообмена. Эти изменения по-разному проявляются в разных условиях формирования инфильтрационного питания (ИП) подземных вод. Для большей части европейской территории России (ЕТР), расположенной в зоне умеренного климата с устойчивым в зимний период снежным покровом, питание подземных вод в период стабильных значений среднегодовой тем-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии, заведующий кафедрой, докт. геол.-минер. н.; *e-mail*: spozd@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии, профессор, докт. геол.-минер. н.; *e-mail*: sogrin@geol.msu.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии, вед. инженер; *e-mail*: lazareva_e_a@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии, вед. инженер; *e-mail*: vnsamartsev@gmail.com

пературы носило сезонный характер, связанный с выраженными максимумами: весенним за счет снеготаяния и менее проявляющимся осенним, когда величина суммарной эвапотранспирации уже значительно меньше, чем количество выпадающих осадков. В таких условиях наблюдаемое и прогнозное увеличение температуры воздуха в холодный период года должно приводить к изменению процессов впитывания влаги в весенне-зимний период и как следствие к трансформации внутригодового распределения питания подземных вод и его среднегодовых величин.

Развитие таких процессов показано на основе ретроспективного модельного анализа влияния наблюдаемых климатических изменений на питание подземных вод территории Московского артезианского бассейна [Гринеvский, Поздняков, 2017], а также подтверждается результатами исследования формирования годового и меженного стока ЕТР [Григорьев и др., 2018; Джамалов и др., 2015; Джамалов и др., 2015; Болгов и др., 2014], которые показывают фактическое увеличение меженного стока рек в многолетнем разрезе, что может быть вызвано увеличением их подземного питания.

Цель нашей работы — анализ связи питания подземных вод в водосборном бассейне площадью несколько тысяч квадратных километров с прогнозными климатическими изменениями, ожидаемыми на ЕТР. Для достижения указанной цели использована физически обоснованная модель, позволяющая рассчитывать ИП подземных вод по результатам моделирования процессов трансформации осадков на поверхности земли и влагопереноса в зоне аэрации. Подобный подход неоднократно использован многими авторами [Li et al., 2011; Leterme et al., 2012; Šimůnek, 2015] для широкого спектра климатических условий на основе широко известной модели Hydrus 1D [Šimůnek, 2009]. Для территорий с устойчивым снежным покровом в работах [Гринеvский, Поздняков, 2010; Grinevskiy, Pozdniakov, 2013; Pozdniakov et al., 2015] разработана методика оценки ИП с учетом процессов накопления и таяния снега, а также поверхностного стокообразования в зимне-весенний период, которые существенно влияют на формирование инфильтрации. Для этого модель Hydrus 1D связана с расчетным модулем Surfbal, учитывающим особенности трансформации осадков и формирования баланса влаги на поверхности земли в зимний период.

Нами методика моделирования, описанная в упомянутых работах, развивается путем использования в программе Surfbal детализированного модельного описания процессов впитывания влаги в почву в зимний период с учетом ее промерзания и оттаивания [Поздняков и др., 2019]. Прогнозные расчеты изменения питания подземных вод в конце XXI в. выполнены на примере водосборного бассейна р. Жиздра в Калужской области на

основе моделирования процессов трансформации влаги на поверхности земли и влагопереноса в зоне аэрации. При этом моделирование сопряжено с результатами глобальных прогнозов по моделям общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) из семейства CM15 путем использования генератора метеоусловий LARSWG5 [Semenov, Stratonovitch, 2010].

Объект исследований. Для анализа многолетней изменчивости питания подземных вод выбран водосбор р. Жиздра выше г. Козельск. Площадь водосбора составляет около 6000 км². На его территории расположена метеостанция I класса Сухиничи и стационарный гидрометрический пост Козельск с доступными данными наблюдений с 1930-х гг. В гидрогеологическом отношении эта территория принадлежит к юго-западной части Московского артезианского бассейна. Верхняя часть зоны интенсивного водообмена сложена надбюрским водоносным комплексом, взаимодействующим через слабопроницаемый верхнеюрский келловей-кимериджский горизонт с напорными водоносными горизонтами каменноугольного возраста. Питание подземных вод происходит за счет площадной инфильтрации атмосферных осадков, а местная разгрузка — в р. Жиздра и ее притоки. Рельеф территории достаточно расчлененный, что приводит к превышению отметок водоразделов над базисом дренирования до 50 м и более и глубокому залеганию уровня грунтовых вод на междуречных пространствах. Известно [Гринеvский, Новоселова, 2011], что на формирование питания существенно влияют ландшафтные условия на поверхности земли. В пределах рассматриваемого водосбора около 50% территории залесено, крупные антропогенные изменения естественных ландшафтов отсутствуют, а часть территории относится к национальному парку Угра. На площади бассейна отсутствуют централизованные крупные водозаборы подземных вод и гидротехнические сооружения, регулирующие сток рек. Таким образом, формирование поверхностного и подземного стока в исследуемом бассейне происходит с минимальным антропогенным вмешательством, поэтому его наблюдаемую изменчивость можно анализировать с позиций выявления влияния глобальных климатических изменений на сток в бассейне малой реки.

На рис. 1 приведены результаты анализа временной динамики подземного стока в бассейне р. Жиздра выше г. Козельск. Как следует из анализа рис. 1, оцененная двумя способами интегральная разгрузка подземных вод в р. Жиздра показывает весьма схожую тенденцию — достаточно стабильный период с конца 1930-х гг. до середины 1960–1970-х гг., затем существенный рост до конца XX в. и вариации в начале XXI в. На рис. 1 также вынесены значения годовой суммы осадков на метеостанции Сухиничи, для которых

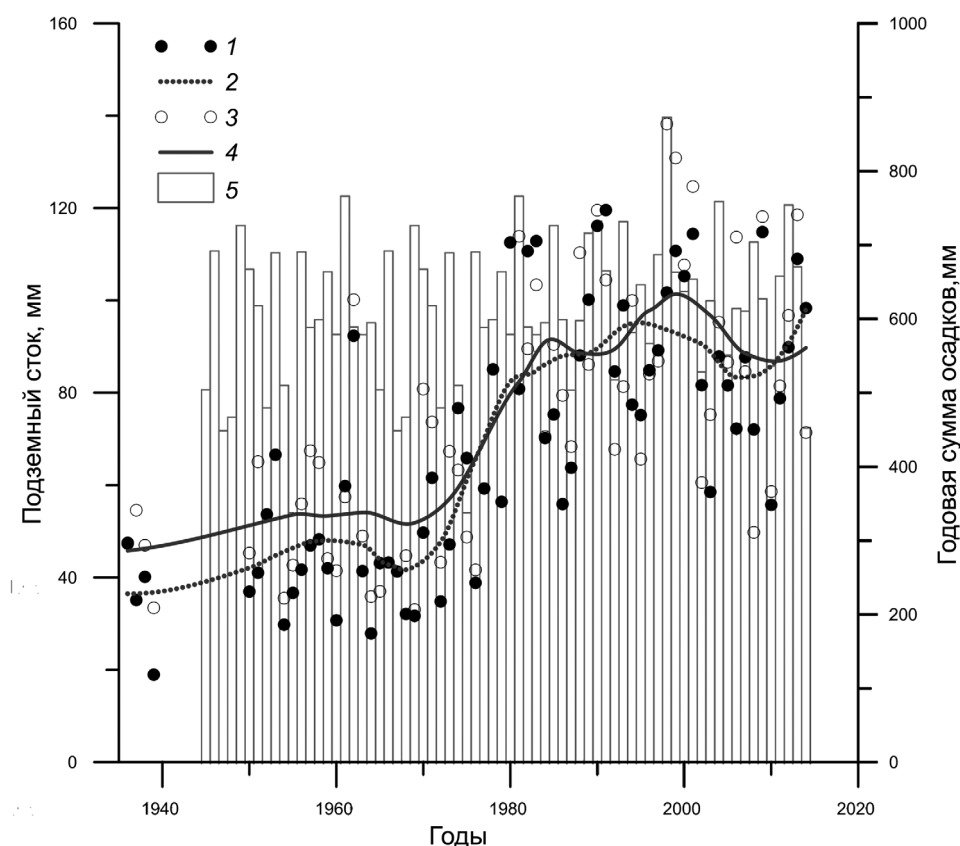


Рис. 1. Динамика подземного стока в р. Жиздра по данным расчленения внутригодовых гидрографов стока: 1 — подземный сток, рассчитанный как средний из минимальных 30-суточных расходов реки в летнюю и зимнюю межень; 2 — аппроксимация этого стока методом локальных полиномов; 3 — подземный сток, рассчитанный по путем расчленения гидрографа стока по Б.И. Куделину; 4 — аппроксимация этого стока методом локальных полиномов; 5 — значения годовой суммы осадков

подобная подземному стоку динамика изменения не проявляется. Это дает основание заключить, что основная причина наблюдаемой динамики подземного стока заключается в многолетней изменчивости ИП, связанной с внутригодовым перераспределением поступления влаги в почву за счет роста температуры [Гринеvский, Поздняков, 2017].

Методика моделирования. Модель формирования ИП состоит из двух взаимосвязанных расчетных модулей. В *первом модуле* моделируется трансформация атмосферной влаги на поверхности земли и выполняется расчет водного баланса в одномерной вертикальной колонке, верхняя условная граница которой соответствует кровле растительного покрова, а нижняя — поверхности почвы. В этом расчетном модуле вычисляется расход поступления влаги в зону аэрации, формирующийся с учетом неравномерности поступления осадков, процессов их задержания и испарения растительностью, условий снегонакопления и снеготаяния, промерзания и оттаивания почвы, а также стокообразования. Численная реализация моделей этих процессов осуществлена в программном коде SurfBal [Гринеvский, Поздняков, 2010]. В текущую версию этого кода [Поздняков и др., 2019] для физически обоснованного моделирования впитывания влаги в зимний период добавлено моделирование процессов тепло-влажнопере-носа в верхней части зоны аэрации с расчетом фазового состава почвенной влаги в холодный период года. Это позволяет разделить поступление талой воды из снега на впитывание и поверхностное

стокообразование и вычислять впитывающую способность почвы, сравнивая ее с потоком влаги, поступающим из тающего снегового покрова.

Результаты моделирования водного баланса на поверхности земли определяют граничное условие на верхней границе *второго расчетного модуля*, представленного моделью одномерного вертикального влагопереноса от поверхности почвы с учетом испарения из почвы и транспирационного отбора влаги корнями растений, реализованной в широко известном программном коде HYDRUS-1D [Šimůnek et al., 2009]. При этом величина ИП оценивается как нисходящий поток влаги через нижнюю границу модели влагопереноса, где задается напор, отвечающий глубине залегания уровня грунтовых вод (УГВ) или условие гравитационного стекания влаги для случая его глубокого залегания. Использование одномерных моделей для количественной характеристики ИП в границах изучаемой территории осуществляется на основе ее районирования по комплексу метеорологических, ландшафтных и гидрогеологических факторов, в сочетании определяющих различия формирования ИП; при этом детальность такого районирования зависит от масштаба исследований [Гринеvский, Поздняков, 2010]. В рассматриваемых границах бассейна р. Жиздра метеорологические условия принимались постоянными, и для моделирования использованы многолетние ряды суточных величин осадков, минимальной, средней, максимальной температуры и влажности воздуха за период с 1945 по 2015 гг. по метеостанции г. Сухиничи.

В качестве основных факторов, определяющих неоднородность условий формирования ИП, рассматривались тип растительного и почвенного покрова, состав и строение верхней части зоны аэрации. Возможные сочетания этих характеристик определяют типичные для этой территории условия ИП, для которых проводится моделирование, и его результаты характеризуют соответствующие этим условиям ландшафты территории. По типу растительного покрова на рассматриваемой территории выделены закрытые залесенные участки («лес») и открытые площади с травянистой растительностью («поле»). В литологическом отношении выделены следующие типы разрезов: песчаный, супесчаный и суглинистый. Таким образом, сочетание двух типов участков и трех типов разрезов приводит к созданию шести типовых модельных профилей, для которых выполнен расчет ИП. В табл. 1 приведены доли площади исследуемого бассейна, относящиеся к каждому профилю.

Таблица 1

Распространение шести расчетных профилей для оценки ИП на площади исследуемого бассейна

Тип разреза	Доля общей площади бассейна	
	тип ландшафта	
	лес	поле
Песчаный	0,14	0,1
Супесчаный	0,21	0,36
Суглинистый	0,1	0,09

При моделировании влагопереноса важно учитывать различие водно-физических свойств почвенных слоев и материнских пород зоны аэрации, которые обусловлены процессами почвообразования и проявляются даже при однотипном литологическом составе, а в верхних почвенных горизонтах зависят также от типа растительности, развитой с поверхности [Гриневский, 2010]. В связи с этим разрез схематизирован тремя расчетными слоями: первый — верхние почвенные горизонты типа А; второй — иллювиальный горизонт типа В, а третий — материнские породы зоны аэрации. В модели влагопереноса для этих слоев задаются кривые зависимости высоты всасывания и коэффициента влагопереноса от влажности, описываемые уравнениями Ван-Генухтена [Šimůnek et al., 2009]. Параметры этих кривых рассчитаны на основе их корреляционных связей с показателями гранулометрического состава и плотностью пород из базы данных Почвенного института имени В.В. Докучаева для Калужской и сопредельных областей (URL:<http://egprp.esoil.ru/download.php>).

В используемой модели влагопереноса интенсивность транспирационного отбора влаги корнями растений по глубине зоны аэрации определяется в зависимости от влажности и распределения относительной плотности корней. При этом в расчетах использованы различные модели

корневых систем и параметры транспирационного отбора, характерные для древесной и травянистой растительности [Гриневский, 2011].

Как известно, среднемноголетнее ИП зависит от средней глубины залегания уровня грунтовых вод (УГВ) и достигает максимальных величин при его глубоком залегании. С позиций вертикального влагопереноса это означает, что между УГВ и приповерхностной зоной интенсивного изменения влажности формируется транзитная зона преимущественного гравитационного стекания влаги. Для оценки влияния будущих климатических изменений на питание величина максимального питания представляется наиболее удобным анализируемым параметром, так как она не зависит от неизвестного положения УГВ. Именно поэтому для каждого моделируемого разреза выбрана глубина расчетного профиля, равная 10 м, а на нижней его границе задается условие гравитационного стекания влаги [Šimůnek et al. 2009]. Расчетное питание для бассейна в целом оценивается после его моделирования для каждого из шести профилей путем осреднения с использованием весовых коэффициентов, приведенных в табл. 1.

Эпигнозное моделирование для периода 1945–2015 гг. Для эпигнозного моделирования выбран период с 1945 по 2015 г. Для каждого из шести типовых разрезов моделировались процессы трансформации влаги на поверхности и в зоне аэрации с суточным шагом изменения метеорологических граничных условий. Поскольку начальное распределение влажности и высоты всасывания неизвестно, то каждое моделирование выполнялось дважды — в первом варианте использовалось гидростатическое распределение высоты всасывания, затем полученное на конец расчетного периода (конец 2015 г.) распределение всасывающего потенциала использовали как начальное условие и делали повторный пересчет. Ежедневное питание подземных вод рассчитывалось, как поток через нижнюю границу модели, которое затем усреднялось до среднемесячных, среднегодовых и среднемноголетних значений. В процессе моделирования не выполняли калибровку параметров расчетных разрезов для получения соответствия модельного питания измеренному максимальному стоку, так как такая калибровка требует включения в общую модель геофильтрационного блока для расчета трансформации питания в сток в нестационарном многолетнем процессе. Тем не менее среднемноголетнее ИП по результатам моделирования составило 56 мм/год, в то время как среднемноголетний слой меженного стока, полученный по средним значениям из минимальных 30-суточных расходов реки в летнюю и зимнюю межень, составляет 67 мм/год. Разницу среднемноголетних величин питания и стока в пределах 20% в соответствии с целью работы можно считать допустимой. На рис. 2 показана временная динамика расчетного

питания подземных вод и слоя меженного стока, полученного по средним значениям минимального 30-суточного расхода реки в летнюю и зимнюю межень в течение эпигнозного периода (1945–2015 гг.).

На рис. 2 на фоне практически стационарных вариаций расчетного годового питания и фактического стока от середины 1940-х до начала 1980-х гг. виден период их увеличения в конце XX в. При этом заметна корреляция между пиковыми значениями питания и минимального стока. Достаточно неожиданной и пока труднообъяснимой оказалась закономерность, видимая из приведенного на рис. 2 сопоставления, которая показывает что амплитуда вариаций годового расчетного питания вполне соответствует амплитуде вариаций минимального слоя стока по фактическим данным. При этом коэффициент вариации минимального слоя стока по данным наблюдений равен 0,39, в то время значение как расчетного коэффициента вариации модельного питания составляет 0,41. Этот результат не согласуется с представлениями о «буферном» влиянии емкости геофильтрационного потока подземных вод, существенно сглаживающем вариации расхода разгрузки подземных вод в водотоки и водоемы по сравнению с вариациями ИП на междуречных пространствах [Pozdniakov, Shestakov, 1998].

Прогноз на вторую половину XXI в. Для прогноза изменения питания во второй половине XXI в. использован переход от прогнозного изменения параметров климата отдельных регионов, полу-

ченных при помощи глобальных моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), к прогнозным вероятностным рядам метеоусловий на поверхности земли с суточным разрешением. Для этого применен генератор метеоусловий LARSWG [Semenov, Stratonovitch, 2010], который позволяет генерировать метеоряды с суточным разрешением на основе заданных статистических характеристик многолетних наблюдений по конкретной метеостанции. В пятую версию этого генератора включена возможность не только генерировать метеоряд по данным наблюдений, но и учитывать прогноз изменения климата для исследуемого региона, выполненный при помощи 5-ти различных МОЦАО из 20 основных моделей, входящих в проект (CMIP5) сравнения различных МОЦАО, проведенного Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) [Semenov, Stratonovitch, 2015].

Известно, что климатические прогнозы при помощи МОЦАО выполняются для разных сценариев эмиссии парниковых газов в атмосферу. Учитывая, что последние данные о динамике климатических изменений указывают на то, что потепление к концу XXI в. ожидается выше, чем на 2 °C [Ratfery et al., 2017], для генерации прогнозных временных метеорядов выбран наиболее экстремальный сценарий развития, характеризующийся максимальным уровнем эмиссии парниковых газов RCP8.5 [Riahi et al., 2011]. В табл. 2 показаны результаты прогноза количества среднегоголетних осадков и температуры воздуха на основе 5-ти

климатических моделей, полученные для территории изучаемого бассейна на период 2060–2080 гг. при выбранном сценарии эмиссии.

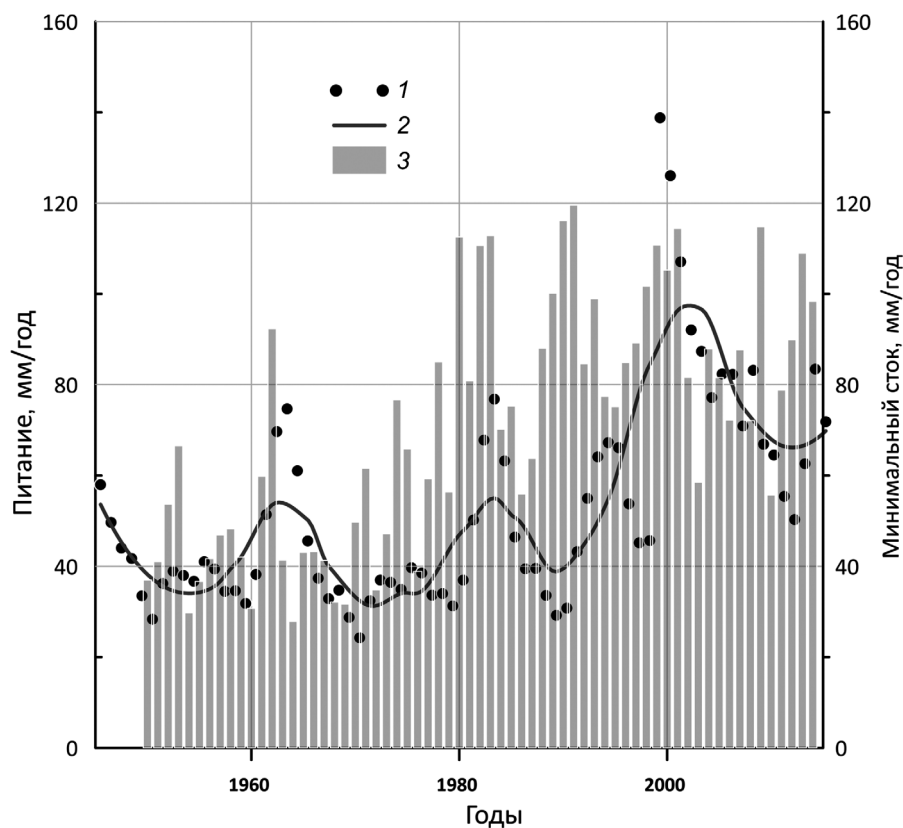


Рис. 2. Результаты эпигнозного моделирования питания подземных вод в пределах бассейна р. Жиздра: 1 — расчетное годовое питание; 2 — аппроксимация этого питания методом локальных полиномов; 3 — подземный сток, рассчитанный как средний из минимальных 30-суточных расходов реки в летнюю и зимнюю межень

Таблица 2

Характеристики прогнозов на 2060–2080 гг., полученных на основе выбранных МОЦАО при экстремальном сценарии эмиссии парниковых газов RCP8.5

Номер п/п	Модель	Страна или группа стран создателей	Прогноз на 2060–2080 гг. для бассейна Жиздры	
			годовая сумма осадков, мм	среднегодовая температура воздуха, °C
1	EC-EARTH	Европа	705	8,5
2	GFDL-CM3	США	725	11,3
3	HadGEM2-ES	Великобритания	540	10,8
4	MIROC5	Япония	690	10,4
5	MPI-ESM-MR	Германия	720	7,2
6	Исходный ряд 1945–2015 гг.		617	5,2

На рис. 3 изображены изменения температуры воздуха и коэффициента изменения осадков по пяти использованным МОЦАО по сравнению с исходным метеорядом на станции Сухиничи. Из анализа рис. 3 и данных табл. 2 следует, что все модели прогнозируют рост температуры воздуха и только одна из пяти моделей прогнозирует уменьшение количества осадков к концу XXI в.

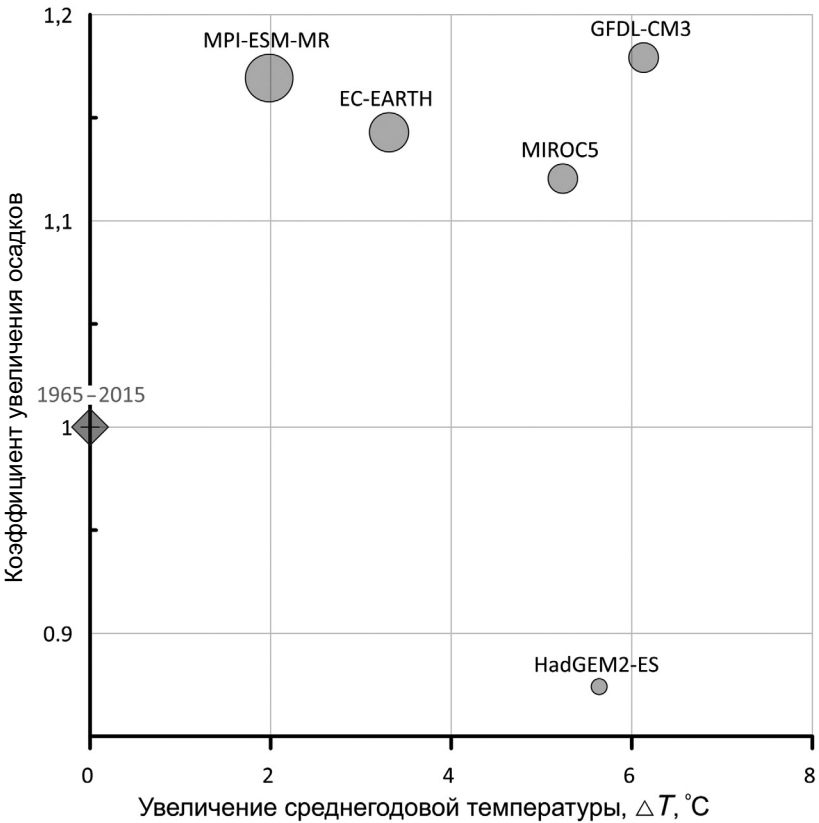
Для каждой модели были сгенерированы временные ряды продолжительностью 100 лет. Выбор такого длинного периода объясняется необходимостью получить по ним устойчивые среднегодовые значения. Сгенерированные временные ряды для каждой МОЦАО использованы как входные метеорологические условия на поверхности земли, при которых выполнено описанное в предыдущих

разделах моделирование ИП подземных вод. Результаты этого моделирования показывают, что все используемые модели предсказывают существенные изменения условий трансформации осадков на поверхности. На рис. 4 показана полученная по результатам моделирования связь двух важных показателей, определяющих баланс влаги на поверхности земли со среднегодовой температурой: среднегодовой потенциальной эвапотранспирации, рассчитанной по зависимости Прислей-Тейлора, и максимального запаса влаги в снегу в зимний период.

Результаты, показанные на рис. 4, свидетельствуют о прогнозируемом увеличении потенциальной эвапотранспирации до 200 мм/год по сравнению с эпигнозным периодом, что приведет к увеличению летнего отбора влаги корнями растений и физического испарения с поверхности почвы. В то же время, как следует из рис. 4, накопленные влагозапасы в снежном покрове существенно (в 2 раза и более) уменьшаются. Это приведет к изменению динамики накопления и расходования влаги на поверхности земли в зимний период за счет эпизодического таяния снега в течение всего холодного периода, а не только в начале апреля, как это происходит в настоящее время.

На рис. 5 график, приведенный на рис. 2, дополнен средними за весь период прогнозного моделирования расчетными величинами среднегодового ИП, полученными на основе всех 5-ти прогнозных моделей, которые отнесены к середине прогнозного интервала — к 2070 г.

Рис. 3. Изменение среднегодовой температуры и суммы годовых осадков по отношению к исходному ряду в период 2060–2080 гг. при экстремальном сценарии эмиссии парниковых газов RCP8.5. Надписи над символами — название модели для прогнозного ряда и период осреднения для наблюдаемого ряда. Размеры символов масштабированы пропорционально значению коэффициента увлажнения (соотношение среднегодовых величин осадков и потенциальной эвапотранспирации)



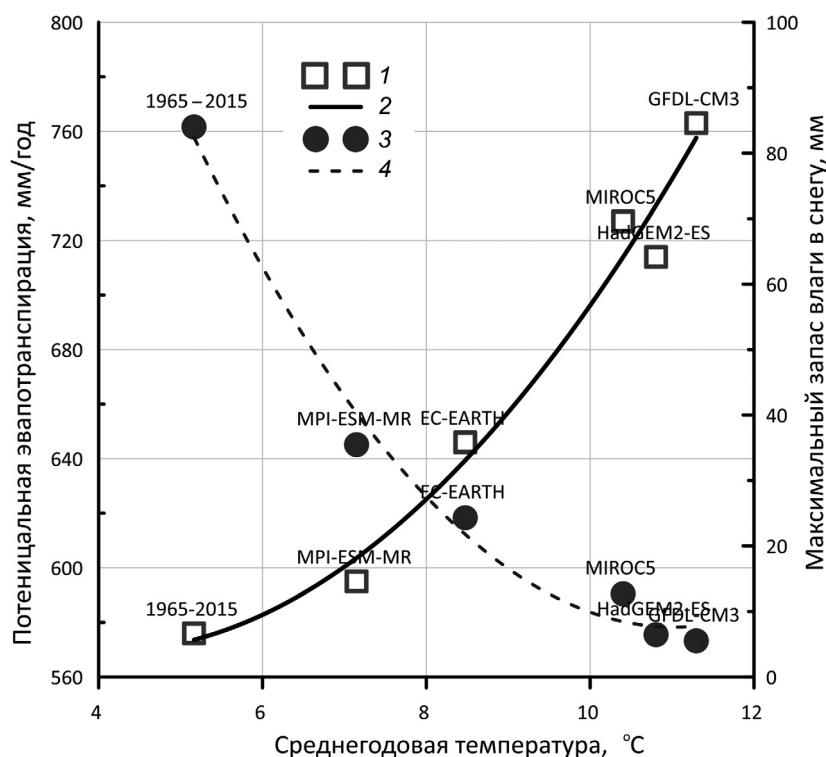


Рис. 4. Зависимость расчетной потенциальной эвапотранспирации и максимального среднегодового запаса влаги в снегу от среднегодовой температуры: 1 — потенциальная эвапотранспирация; 2 — ее аппроксимация полиномом 2-й степени; 3 — запас влаги в снегу; 4 — его аппроксимация полиномом 2-й степени. Надписи над символами — название модели или продолжительность эпигнозного периода, для которого выполнено осреднение

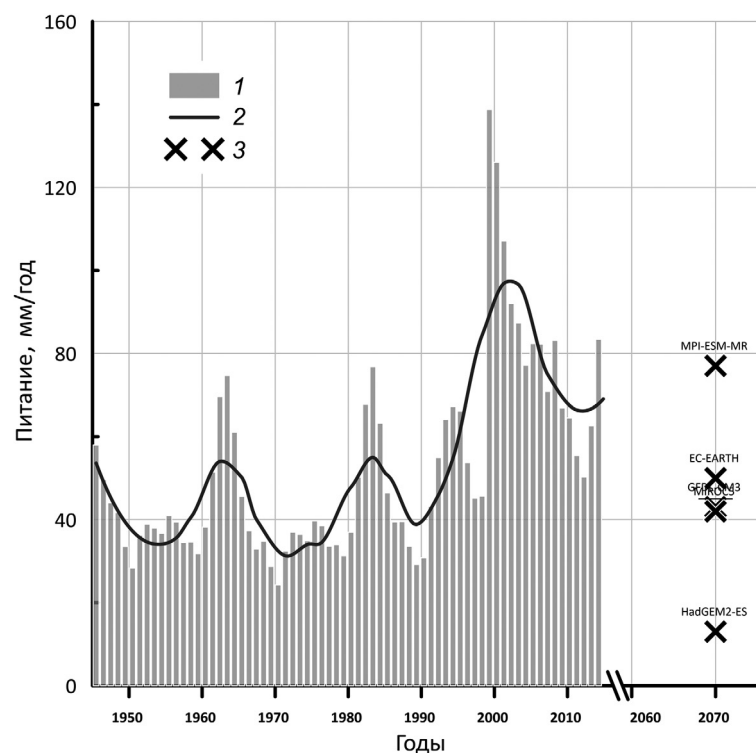


Рис. 5. Результаты прогнозного моделирования питания подземных вод в пределах бассейна р. Жиздра: 1 — расчетное среднегодовое питание в эпигнозный период; 2 — аппроксимация этого питания методом локальных полиномов; 3 — расчетное среднегодовое питание для 5 прогнозных моделей за период 2060–2080 гг.

Из анализа рис. 5 следует, что из 5-ти прогнозных моделей 3 дали достаточно близкие значения прогнозного инфильтрационного питания, а 2 — значения, отличающиеся от них в большую и меньшую сторону. При этом разница максимального (модель MPI-ESM-MR) и минимального (модель HadGEM2-ES) прогнозного среднегодового питания соизмерима с амплитудой вариации питания в эпигнозный период 1945–2015 гг.

Для выявления факторов, влияющих на прогнозируемое изменение ИП, на рис. 6 показана зависимость изменения среднегодового прогнозного питания по сравнению с питанием в эпигнозный период Δw от расчетного коэффициента увлажнения, значение которого для каждой прогнозной модели рассчитывается как отношение среднегодовых величин осадков к потенциальной эвапотранспирации по Прислей — Тейлору.

Из анализа рис. 6 следует, что между изменением питания и значениями коэффициента увлажнения существует практически линейная связь, показывающая увеличение питания с повышением значения коэффициента увлажнения. Подобная связь согласно рис. 6 прослеживается и с влагозапасами в снегу. Из 5-ти рассматриваемых моделей именно модель MPI-ESM-MR, прогнозирующая максимальную величину Δw характеризуется не только максимальным коэффициентом увлажнения, но и прогнозирует максимальную величину влагозапаса в снегу. Максимальное уменьшение питания (отрицательная величина Δw) прогнозирует модель HadGEM2-ES, показывающая также минимальные значения коэффициента увлажнения и влагозапасы снега. Таким образом, прогнозные коэффициент увлажнения и влагозапасы снега в рассматриваемых условиях — основные факторы, определяющие прогнозируемое изменение питания подземных вод.

Заключение. Анализ многолетней динамики минимального стока р. Жиздра в период с середины 1930-х гг. XX в. до настоящего времени подтвердил неоднократно

отмечаемую разными авторами тенденцию к увеличению минимального стока рек ЕТР в последней четверти XX в. Эпигнозное моделирование ИП подземных вод для исследуемого бассейна показывает, что этот рост может быть интерпретирован как увеличение подземного стока в реку, вызванное увеличением в этот период инфильтрационного питания на междуречных пространствах.

Данные исследований позволяют сделать выводы о перспективности рассмотренного подхода использования прогнозных результатов, полученных при помощи глобальных МОЦАО, для анализа процессов формирования питания подземных вод путем моделирования трансформации влаги на поверхности земли и влагопереноса в зоне аэрации. Именно такой подход позволяет выявлять, как тенденции прогнозируемых климатических изменений трансформируются в изменения водного баланса на поверхности земли в зоне аэрации, приводящие к изменению питания подземных вод, а также оценивать чувствительность расчетных изменений питания к параметрам прогнозных климатических моделей.

Моделирование изменения питания подземных вод для 5-ти выбранных МОЦАО показало, что во второй половине XXI в. на исследуемой территории существенно изменятся условия трансформации осадков на поверхности водосборного бассейна и в зоне аэрации. Эти изменения связаны с увеличением потенциальной эвапотранспирации и как следствие с увеличением испарения с поверхности и транспирации в теплый период года, а также с изменением процессов накопления и таяния снега в холодный период года, что приведет к уменьшению влагозапаса в снегу и изменению сроков и продолжительности снеготаяния. В той или иной степени прогноз при помощи каждой рассмотренной МОЦАО включает упомянутые выше увеличение потенциальной эвапотранспирации и уменьшение влагозапаса в снегу, так как все модели прогнозируют рост среднегодовой температуры воздуха.

Результаты моделирования также показывают, что изменение среднегодовое прогнозного питания подземных вод по отношению к среднегодовому питанию в эпигнозный период увеличивается пропорционально увеличению расчетных значений коэффициента увлажнения и

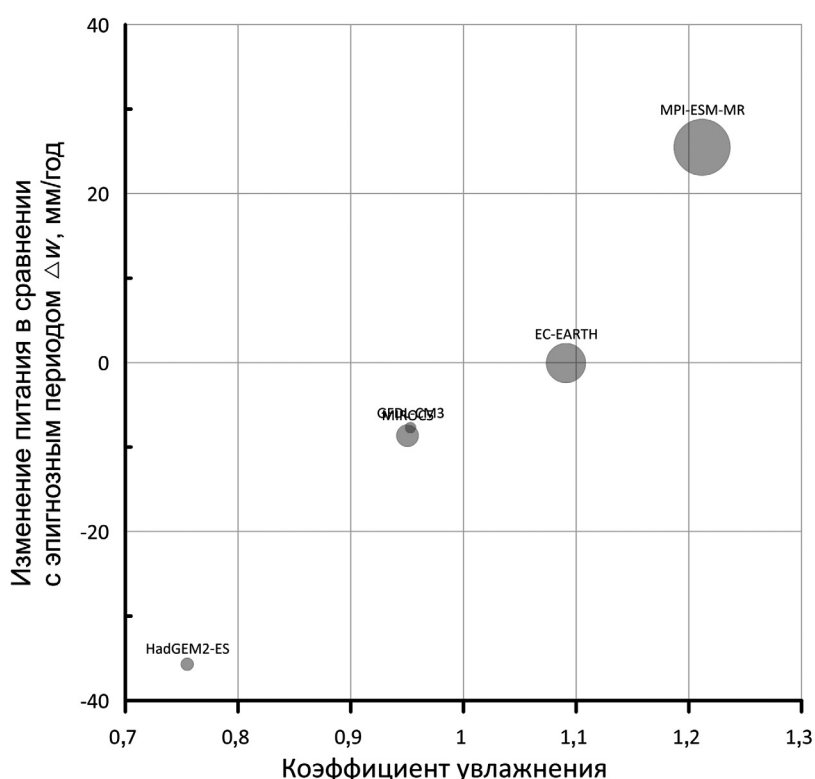


Рис. 6. Зависимость между прогнозными величинами изменения среднегодового питания и коэффициента увлажнения. Надписи над символами — названия моделей из табл. 2, символы масштабированы по величине максимального среднегодового влагозапаса в снегу

влагозапаса в снегу, полученных на основе разных прогнозных МОЦАО.

Тем не менее различия между результатами моделирования питания, полученными на основе генерации рядов осадков, и для значений температуры для разных прогнозных МОЦАО все еще слишком велики, чтобы давать на их основе достоверные прогнозы изменения ИП подземных вод во второй половине XXI в. Различие прогнозных изменений ИП, полученных на основе 5-ти выбранных климатических моделей, составляет около 65 мм/год, причем модель MPI-ESM-MR дает увеличение питания более чем на 30 мм/год, модель HadGEM2-ES показывает уменьшение питания на 30 мм/год, а оставшиеся 3 модели прогнозируют уменьшение питания меньше чем на 10 мм/год. Такой разброс результатов связан с тем, что, несмотря на то что все выбранные модели прогнозируют увеличение температуры, различие количества прогнозных осадков и значений коэффициента увлажнения между ними все еще слишком велико, а, как показали наши исследования, именно прогнозное изменение значений коэффициента увлажнения наиболее существенно влияет на изменение питания подземных вод.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 16-17-10187).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Болгов М.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д. и др. Современные изменения минимального стока на реках бассейна р. Волга // Метеорология и гидрология. 2014. № 3. С. 75–85.

Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Джамалов Р.Г. Изменение водного баланса крупных речных бассейнов европейской части России // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 4. С. 36–47.

Гринеvский С.О. Схематизация строения и параметров зоны аэрации для моделирования инфильтрационного питания подземных вод // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2010. № 6. С. 56–67.

Гринеvский С.О. Моделирование поглощения влаги корнями растений при расчетах влагопереноса в зоне аэрации и инфильтрационного питания подземных вод // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2011. № 3. С. 41–52.

Гринеvский С.О., Новоселова М.В. Закономерности формирования инфильтрационного питания подземных вод // Водн. ресурсы. 2011. Т. 38, № 2. С. 169–180.

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.

Гринеvский С.О., Поздняков С.П. Ретроспективный анализ влияния климатических изменений на формирование ресурсов подземных вод // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2017. № 2. С. 42–50.

Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Телегина Е.А. Изменение зимнего стока рек европейской части России // Водн. ресурсы. 2015. Т. 42, № 6. С. 581–588.

Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Рец Е.П., Бугров А.А. Особенности формирования современных ресурсов подземных вод европейской части России // Водн. ресурсы. 2015. Т. 42, № 5. С. 457–466.

Поздняков С.П., Гринеvский С.О., Дедюлина Е.А., Кореко Е.С. Чувствительность моделирования сезонного промерзания к расчетной модели теплопроводности снежного покрова // Снег и лед. 2019. № 1.

Grinevskiy S.O., Pozdniakov S.P. The use of hydrus-1d for groundwater recharge estimation in boreal environments // Proceed. of the 4th Intern. Conference «HYDRUS

Software Applications to Subsurface Flow and Contaminant Transport Problems», March 21–22, 2013. Dept. of Soil Science and Geology, Czech University of Life Sciences Prague, Czech Republic, 2013.

Leterme B., Mallants D., Jacques D. Sensitivity of groundwater recharge using climatic analogues and Hydrus-1d // Hydrology and Earth System Sci. 2012. Vol. 16. P. 2485–2497. <http://doi.org/10.5194/hess-16-2485-2012>

Lu X., Jin M., van Genuchten M.Th., Wang B. Groundwater recharge at five representative sites in the Hebei Plain of china: case study // Ground Water. 2011. Vol. 49, N 2. P. 286–294.

Pozdniakov S.P., Shestakov V.M. Analysis of groundwater discharge with a lumped-parameter model, using a case study from Tajikistan // Hydrogeol. J. 1998. Vol. 6, N 2. P. 226–232.

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 // Engineer. Geol. and Hydrogeol. Bulgarian academy of Sciences. 2015. N 29. P. 47–58.

Raftery A.E., Zimmer A., Frierson D.M.W., Startz R. et al. Less than 2 degrees C warming by 2100 unlikely // Nature Climate Change. 2017. 07.31. (online).

Riahi K., Rao S., Krey V. et al. Scenario of Comparatively High Greenhouse Gas Emissions. Climatic Change. 2011. Vol. 109, N 33. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>.

Semenov M.A., Stratonovitch P. Adapting wheat ideotypes for climate change: accounting for uncertainties in CMIP5 climate projections // Climate Res. 2015. Vol. 65. P. 123–139. <http://doi.org/10.3354/cr01297>.

Semenov M.A., Stratonovitch P. The use of multi-model ensembles from global climate models for impact assessments of climate change // Climate Res. 2010. Vol. 41. P. 1–14.

Šimůnek J. Estimating groundwater recharge using HYDRUS-1D // Engineering geology and Hydrogeology. Bulgarian academy of Sciences. 2015. N 29. P. 25–36.

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.

Поступила в редакцию 25.10.2018

Поступила с доработки 02.12.2018

Принята к публикации 11.12.2018