

УДК 556.16

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА РЕК ГОРНОГО КРЫМА В СОВРЕМЕННЫХ И ПРОГНОЗИРУЕМЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ¹

© 2024 г. А. С. Калугин*, Ю. Г. Мотовилов, Н. О. Попова, Т. Д. Миллионщикова

Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия*e-mail: andrey.kalugin@iwp.ru*

Поступила в редакцию 30.03.2024 г.

После доработки 05.06.2024 г.

Принята к опубликованию 07.06.2024 г.

Модель формирования стока ECOMAG применена для расчетов физически обоснованных изменений водного режима рек горного Крыма в XXI в. с использованием данных ансамбля климатических моделей с учетом различных сценариев глобального потепления. Объектами исследования были реки Черная, Бельбек, Дерекойка, Альма, Салгир, Бурульча, Тонас, Кучук-Карасу, Индол. Модели формирования естественного речного стока для указанного набора речных бассейнов построены на основе однородных источников информации о гидрометеорологическом режиме и параметрах подстилающей поверхности. Верификация гидрологических моделей проводилась путем сопоставления фактических и рассчитанных среднесуточных и среднемесячных расходов воды на различных гидрометрических постах за многолетний период. Затем с помощью гидрологических моделей по данным ансамбля глобальных климатических моделей относительно базового периода 2006–2020 гг. были оценены сценарные будущие изменения стока рек за год, условно теплый и холодный сезоны года. При реализации любого из RCP-сценариев в ближайшей перспективе на 2021–2050 гг., равно как и при сценариях RCP 2.6 и RCP 4.5 в конце XXI в., дефицит водных ресурсов может отмечаться в основном в речных бассейнах, расположенных к востоку от верховьев Салгира, впрочем, не достигая катастрофических показателей. Согласно более агрессивным климатическим сценариям RCP 6.0 и RCP 8.5, в конце XXI в. вероятно наибольшее сокращение стока рек горного Крыма, что будет способствовать развитию дефицита водных ресурсов за счет атмосферных источников.

Ключевые слова: речной сток, Крым, изменение климата, моделирование.

DOI: 10.31857/S0321059624060068 EDN: VOZFUB

ВВЕДЕНИЕ

Для оценки гидрологических последствий будущих изменений климата наиболее перспективным применением моделей формирования речного стока, которые в качестве метеорологического обеспечения используют данные глобальных климатических моделей. В научной литературе описаны частные примеры применения моделей формирования стока для рек Крыма. Известен опыт моделирования паводков в бассейне р. Дерекойки с использованием гидрологического блока модели WRF [13] и модели “Гидрограф” [2], а также среднемесячного притока воды в Симферопольское водохранилище по модели

MWSWAT [1]. Комплексных оценок изменения будущего стока рек Крыма не существует. В данном исследовании была поставлена цель построить модели формирования стока для целого ряда рек Крыма на основе одного программного комплекса и использования однородных источников информации. Это необходимо для корректного сравнения реакций разных рек на сценарии климатических изменений.

Выбор репрезентативных речных водосборов для моделирования формирования стока был обусловлен минимальным с учетом наличия гидротехнических сооружений и населенных пунктов антропогенным воздействием. При этом выбирались все наиболее крупные речные бассейны, на которых организованы измерения речного стока на государственной сети стационарных наблюдений. Список объектов для построения моделей формирования стока вклю-

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ИВП РАН (тема FMWZ-2021-0001 “Разработка методической базы и цифровых технологий поддержки принятия решений по обеспечению водной безопасности Крыма”).

чает верховья рек северного склона Главной гряды Крымских гор (Салгир, Бельбек, Черная, Альма, Индол и реки бассейна Салгира: Бурульча, Тонас, Кучук-Карасу), а также р. Дерекойку, относящуюся к южному склону Главной гряды Крымских гор.

По оценкам авторов данного исследования на основе данных наблюдений в период 2006–2020 гг., в пределах указанных речных бассейнов среднемноголетняя температура воздуха варьирует от 8.8°C в бассейне Тонаса до 10.8°C в бассейне Бельбека. Для всех водосборов наиболее теплый месяц – август со средней температурой воздуха ~21°C, наиболее холодный – январь со средней температурой немного ниже 0°C. Наибольшая среднемноголетняя сумма осадков соответствует бассейну р. Черной, наименьшая – бассейну р. Индол. При этом доля осадков за холодный период года с ноября по апрель начиная с бассейна р. Бурульчи и далее в юго-западном направлении составляет 51–60% годовой суммы с наибольшей величиной для р. Черной. В бассейнах рек Тонас, Кучук и Индол преобладают осадки в теплый период года с мая по октябрь, составляя ~60% годовой суммы (рис. 1). Наибольший модуль стока 41.5 л/(с км²) соответствует бассейну р. Черная – с. Родниковское, наименьший 0.87 л/(с км²) – р. Тонас в створе г. Белогорска.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Для исследования физически обоснованных изменений водного режима использовалась модель формирования стока ECOMAG [4], которая была ранее адаптирована для разных рек Европейской и Азиатской частей России [6, 10, 11]. Модель с суточным шагом рассчитывает формирование снежного покрова и снеготаяние, инфильтрацию воды в почву и испарение, термический и водный режим почвы с учетом процессов ее промерзания и оттаивания, формирование поверхностного, внутрипочвенного, грунтового стока, движения воды по русловой сети. Построение модельной речной сети и схематизация горных речных бассейнов Крымского п-ова, включающая разбиение водосборов на расчетные элементы модели разного размера, проводилась на основе цифровой модели ре-

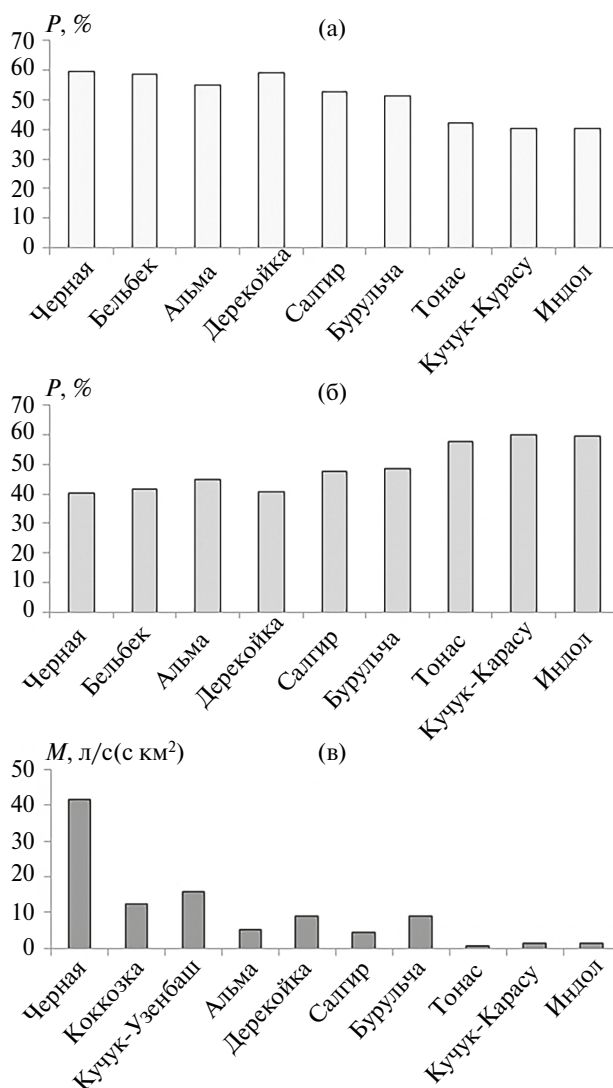


Рис. 1. Доля осадков P в течение периодов с ноября по апрель (а) и с мая по октябрь (б), оцененные для исследуемых речных бассейнов за период 2006–2020 гг., среднегодовой модуль стока M рек Крыма в исследуемых створах, оцененные за период 2014–2020 гг. (в).

льефа ALOS разрешения 30 м [14]. В результате модельной схематизации речные бассейны разделены на 27–177 элементарных водосборов со средней площадью 1.6–2.9 км². Для определения параметров моделей формирования стока, распределенных по площади речных бассейнов, использованы глобальные базы данных о характеристиках почв SoilGrids с пространственным разрешением 250 м [12] и землепользования GLC_FCS30 с пространственным разрешением 30 м [15]. Для каждого из пяти типов почв

определены следующие гидрофизические характеристики: объемная плотность, пористость, наименьшая полевая влагемкость, влажность завядания, коэффициент фильтрации. Для каждого из 16 типов землепользования в Крыму заданы следующие параметры моделей формирования стока: коэффициенты стаивания снега и инфильтрации, испарения почвенной влаги и промерзания почвы.

База исходной метеорологической информации включает временные ряды измерений среднесуточных температуры и влажности приземного воздуха, количества атмосферных осадков на 14 действующих метеостанциях за период 2006–2020 гг. из открытых источников: Почтовое, Аэропорт, Симферополь, Курортный, Ангарский перевал, Алушта, Белогорск, Владиславовка, Феодосия, Ялта, Севастополь, Херсонесский маяк, Никита, Ай-Петри (рис. 2). Нужно отметить, что из 14 метеостанций непосредственно на территории исследуемых водосборов расположены только 3, причем 2 из них – в замыкающих створах рек. Кроме того, абсолютные высотные отметки, на которых расположены метеостанции Крыма, превышают 300 м только для двух метеостанций: Ай-Петри (1180 м) и Ангарский перевал (780 м). Эти два важных аспекта, безусловно, осложняют процесс моделирования стока, внося погрешности как при горизонтальной, так и при вертикальной интерполяции метеорологических характеристик в пределах исследуемых речных бассейнов.

Для калибровки параметров моделей использованы многолетние ряды среднесуточных расходов воды на гидрометрических постах, которые получены по данным открытой системы АИС ГМВО. Используются данные о стоке на действующих гидрологических постах: р. Черная – с. Родниковское, р. Альма – выше водохранилища Партизанское, р. Дерекойка – г. Ялта, р. Салгир – с. Пионерское, р. Бурульча – с. Межгорье, р. Тонас – г. Белогорск, р. Кучук-Карасу – с. Богатое, р. Индол – с. Тополевка (рис. 2). В бассейне р. Бельбек выбраны два расчетных створа на вложенных водосборах при одновременном модельном расчете: р. Коккозка – с. Аромат и р. Кучук-Узенбаш – с. Многоречье. Это связано с тем, что сток в створе

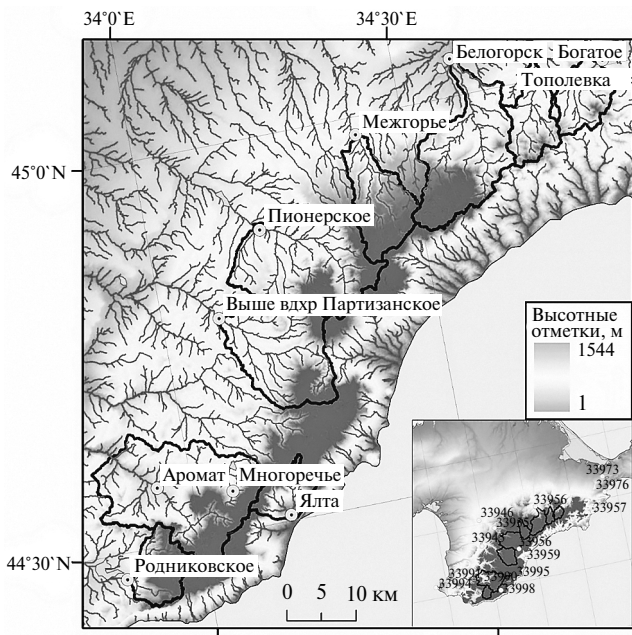


Рис. 2. Гидрометрические посты, по которым даны о среднесуточных расходах использованы при моделировании формирования стока исследуемых рек Крыма: р. Черная – с. Родниковское, р. Альма – выше водохранилища Партизанское, р. Дерекойка – г. Ялта, р. Салгир – с. Пионерское, р. Бурульча – с. Межгорье, р. Тонас – г. Белогорск, р. Кучук-Карасу – с. Богатое, р. Индол – с. Тополевка, р. Коккозка – с. Аромат, р. Кучук-Узенбаш – с. Многоречье. Метеостанции: 33945 Почтовое, 33946 Аэропорт, 33955 Симферополь, 33957 Курортный, 33958 Ангарский перевал, 33959 Алушта, 33966 Белогорск, 33973 Владиславовка, 33976 Феодосия, 33990 Ялта, 33991 Севастополь, 33994 Херсонесский маяк, 33995 Никита, 33998 Ай-Петри.

р. Бельбек – пгт Куйбышево подвержен значительному антропогенному преобразованию и не отражает естественных условий его формирования. Таким образом, расчеты стока проведены по гидрологическим моделям девяти речных бассейнов для десяти гидрометрических створов.

Период калибровки параметров моделей формирования стока выбран с учетом следующих ограничений: данные о среднесуточных расходах воды на разных гидрометрических постах рек Крыма в системе АИС ГМВО содержатся за период 2014–2020 гг., а метеорологические данные базы RP5 имеют длительный пропуск по 12–13 метеостанциям из 14 за период с 1 апреля 2015 г. по 10 мая 2017 г., что, есте-

ственно, крайне негативно сказывается на результатах моделирования. В связи с этим непрерывным калибровочным периодом был выбран 2018–2020 гг. При расчетах стока в моделях в зависимости от расположения относительно конкретного водосбора использовались данные четырех метеостанций бассейна Бельбека, трех метеостанций – Салгира, Черной, Альмы, Бурульчи и одной метеостанции – Дерекойки, Тонас, Кучук-Карасу, Индола. На этапе калибровки параметров моделей по распространенным в международной практике гидрологического моделирования критериям Клинга–Гупты KGE [8] и относительной систематической погрешности расчета PBIAS была оценена точность расчета среднесуточного стока в разные фазы водного режима. Качество расчетов тем лучше, чем ближе значение KGE к единице, а PBIAS – к нулю. Учитывая указанные ограничения по гидрометеорологическим данным и цель по оценке долгосрочных изменений водного режима рек (не отдельных событий экстремального стока), логично провести верификацию гидрологических моделей по эффективности воспроизведения среднемесячного стока за весь доступный период. Верификация моделей бассейнов девяти указанных рек проводилась на основе данных о среднемесячном стоке за весь период 2014–2020 гг.

Для расчетов гидрологических последствий изменений климата в речных бассейнах Крыма в течение XXI в. была подготовлена необходимая для модели ECOMAG среднесуточная метеорологическая информация с использованием данных расчетов ансамбля глобальных климатических моделей (GCMs) CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) из проекта ISIMIP (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project). Выходные данные моделей климата проинтерполированы на регулярную по широте и долготе сетку 0.5° с использованием процедуры даунскейлинга. Для интерполяции метеоданных на исследуемой территории горного Крыма использовались 8 расчетных узлов сетки климатических моделей. В этих данных за период наличия наблюдений с целью улучшения качества воспроизведения внутригодового хода метеозадаваемых элементов проведена процедура устранения модельных

систематических ошибок с привлечением данных реанализов семейства ERA, данных базы Climate Research Unit TS2.1 (CRU), глобального центра климатологии по атмосферным осадкам (GPCC) и данных earth2Observe и NASA/GEWEX о коротковолновой и длинноволновой солнечной радиации [9]. По данным ансамбля четырех GCMs (GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC5) для расчетов гидрологических последствий изменения климата на будущий период до конца XXI в. были подготовлены проекции глобальных климатических изменений согласно сценариям RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5.

Поскольку расчетная сетка GCMs с разрешением 0.5° не позволяет их использовать для расчетов стока малых горных водосборов Крыма в явном виде (на один расчетный узел GCMs приходится площадь территории, на 1–2 порядка большей, чем территория исследуемых речных бассейнов), когда климатические данные задаются в качестве граничных условий в гидрологические модели, то использовался так называемый метод “delta-change” [7]. При этом данные о будущих климатических нормах среднемесячных метеорологических величин для всей расчетной области горного Крыма были трансформированы в ряды соответствующих среднесуточных величин. Для трансформации использовались среднесуточные данные метеорологических наблюдений на 14 метеорологических станциях, фигурирующих на этапе верификации гидрологических моделей, за доступный период 2006–2020 гг. В результате трансформации были получены ряды среднесуточных данных в точках метеостанций, такие, что нормы среднемесячных значений в трансформированных рядах стали равны климатическим нормам, определенным в среднем для горной части Крыма по GCMs для периодов ближайшей перспективы – 2021–2050 гг. и конца XXI в. – 2070–2099 гг. Построенные ряды среднесуточных значений метеорологических элементов задавались в качестве граничных условий в гидрологические модели для расчетов будущего стока рек. Аномалии гидрометеорологических характеристик оценены для периодов ближайшей перспективы и конца XXI в. относительно базового 2006–2020 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Моделирование формирования стока в современных климатических условиях

Для девяти из десяти расчетных створов рек Крыма получены удовлетворительные результаты расчета среднесуточных и среднемесячных расходов воды. Значения критерия KGE варьируют от 0.42 до 0.71 по среднесуточному стоку и от 0.44 до 0.72 по среднемесячному стоку, а критерия PBIAS – от 2 до 36% (табл. 1). Лишь для р. Альмы текущая настройка гидрологической модели не позволяет получить удовлетворительного качества расчеты среднесуточного стока при значительном систематическом завышении стока моделью. Успешно протестированные гидрологические модели были использованы для оценки гидрологических последствий будущих изменения климата в XXI в. по данным ансамбля глобальных климатических моделей.

Оценки изменений будущего климата в горной части Крыма

Согласно данным GCM, в течение периода 2021–2050 гг. возможен рост среднегодовой температуры воздуха в горной части Крыма на 0.5–0.7°C при сценариях RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 и на 1°C при RCP 8.5 (рис. 3). Более интенсивное потепление будет характерно для теплого периода года с мая по октябрь – в среднем на 0.2°C выше, чем для остальной части года. Рост среднегодовой температуры воздуха к концу XXI в. составит 0.8°C при RCP 2.6, 1.6°C при RCP 4.5,

2.1°C при RCP 6.0, 3.5°C при RCP 8.5. При этом разница потепления между теплым и холодным периодами года возрастает с увеличением экстремальности RCP-сценария: ~0°C при RCP 2.6 и период с мая по октябрь теплее на 0.6°C при RCP 8.5.

Будущие изменения годовой суммы осадков в среднем по горной части Крыма невелики – от –3 до +3% для всех сценариев в ближайшей перспективе и для RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 в конце XXI в. Несколько выделяется только наиболее негативный сценарий RCP 8.5 – к концу XXI в. снижение количества осадков составит ~6% (рис. 3). Оценивая изменения осадков по сезонам, нужно отметить значения >5%: для осадков теплого периода года положительная аномалия в 9% при RCP 2.6 в ближайшей перспективе и 14% при RCP 2.6 в конце XXI в., отрицательная аномалия в 7 и 13% в конце XXI в. согласно RCP 6.0 и RCP 8.5 соответственно. Схожие оценки изменения осадков в Крыму получены в [5].

Увеличение среднегодового дефицита влажности воздуха составит 5–9% в период 2021–2050 гг. в зависимости от RCP-сценария, причем аномалии для теплого периода будут в среднем на 2% выше, чем с ноября по апрель. Рост среднегодового дефицита влажности воздуха к концу XXI в. составит 7% при RCP 2.6, 15% при RCP 4.5, 20% при RCP 6.0, 35% при RCP 8.5. При этом контраст значений для теплого и холодного периодов года возрастает с увеличением экстремальности RCP-сценария: почти равенство между сезонами при RCP 2.6 и за период с мая

Таблица 1. Оценка эффективности моделирования стока рек Крыма по критериям KGE и BIAS за период калибровки по среднесуточным расходам воды, за период верификации по среднемесячным расходам воды

Водосбор	F, км²	Норма стока, м³/с	Калибровка		Верификация	
			KGE	PBIAS, %	KGE	PBIAS, %
р. Салгир – с. Пионерское	261	1.17	0.71	2	0.67	–10
Коккозка – с. Аромат	83.6	1.03	0.63	16	0.68	–10
Индол – с. Тополевка	71	0.11	0.63	18	0.53	–19
Кучук-Карасу – с. Богатое	89	0.14	0.62	16	0.50	–23
Дерекойка – г. Ялта	49.7	0.45	0.57	–8.9	0.72	–17
Бурульча – с. Межгорье	85	0.78	0.54	15	0.57	–12
Кучук-Узенбаш – с. Многогорье	10	0.16	0.52	–16	0.44	–32
Черная – с. Родниковское	47	1.95	0.48	30	0.71	4
Тонас – г. Белогорск	184	0.16	0.42	36	0.50	18
Альма – выше вдхр Партизанское	184	1.0	–0.25	95	0.05	56

по октябрь аномалии выше на 7% при RCP 8.5 (рис. 3).

*Моделирование формирования стока
в прогнозируемых климатических условиях*

Согласно расчетам по моделям формирования стока, при реализации сценария RCP 2.6 в ближайшей перспективе возможно сокращение годового стока исследуемых рек Крымского

п-ова на 1–14% с величиной выше 10% для рек Дерекойки, Бурульчи и Тонас (рис. 4). Для стока Индола, наоборот, отмечена положительная аномалия в 6%. Это связано с тем, что для рек Дерекойки, Бурульчи и Тонас в течение мая–октября отмечено снижение стока, в то время как для остальных рек – наоборот, увеличение стока в среднем на 15%. Для Индола в течение ноября–апреля характерна слабая положительная аномалия стока, а для остальных рек – снижение

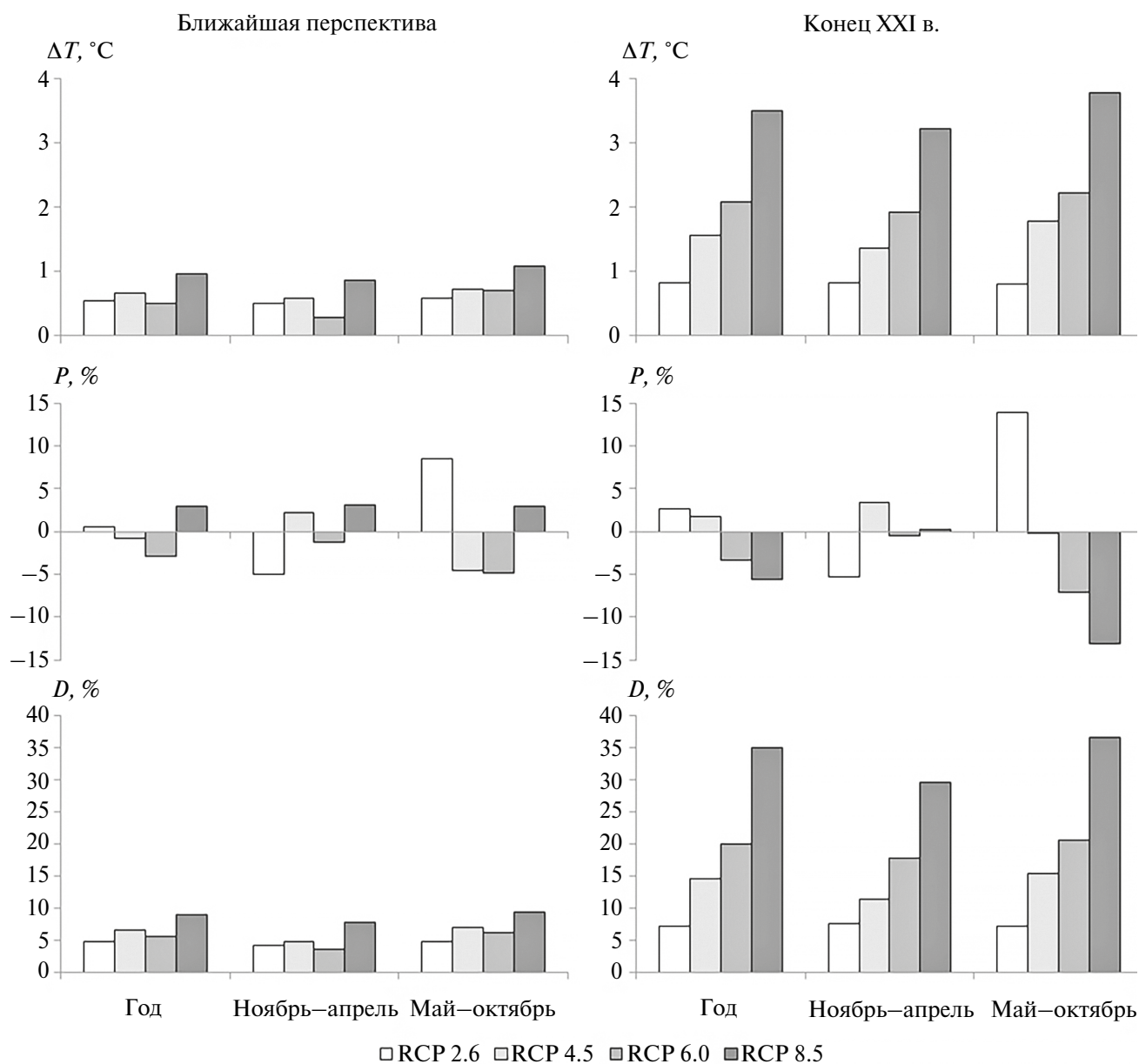


Рис. 3. Аномалии годовых и сезонных величин температуры воздуха, осадков и дефицита влажности воздуха для горной территории Крыма в XXI в. согласно данным GCMs при реализации разных RCP-сценариев на период ближайшей перспективы (слева) и на конец XXI в. (справа) относительно базового периода 2006–2020 гг.

водоносности в среднем на 13%. По сценарию RCP 4.5, в ближайшей перспективе аномалии годового стока рек – в основном в диапазоне от -3 до $+3\%$, за исключением рек Бурульчи, Тонас и Кучук-Карасу, для которых отмечено снижение стока на 8–12%. В течение теплого периода года отрицательные аномалии стока рек варьируют от 13 до 49% (рис. 4). В течение холодного периода года увеличение стока рек составляет 1–4%, выделяется только р. Индол с увеличением стока на 18%. Это позволяет исключить р. Индол из категории рек со значительным снижением годового стока, расположенных к востоку от верховьев Салгира.

При реализации сценария RCP 6.0 в ближайшей перспективе пространственные изменения

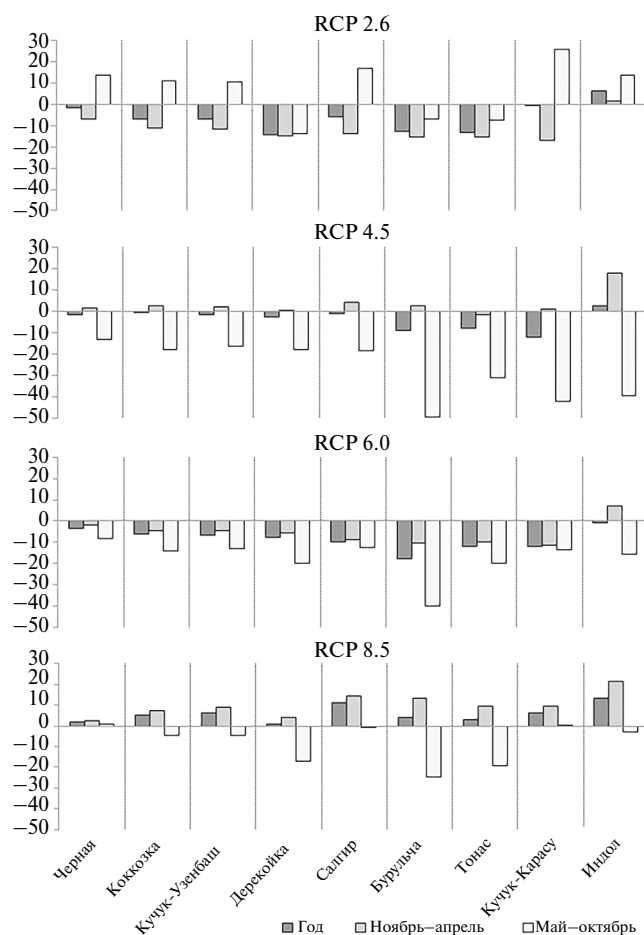


Рис. 4. Аномалии годовых и сезонных величин стока рек горного Крыма согласно результатам гидрологического моделирования на основе данных GCMs при сценариях RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5 на период ближайшей перспективы.

стока рек Крыма в значительной степени схожи с изменениями по сценарию RCP 4.5, только отрицательные аномалии годового стока больше в среднем на 5%. При этом в теплый период года снижение стока меньше в среднем на 10%, а в течение холодного периода – когда реки более полноводны – слабые положительные аномалии стока при RCP 4.5 сменяются отрицательными значениями в среднем на 7%, за исключением Индола с увеличением стока при RCP 6.0 (рис. 4). Согласно наиболее экстремальному сценарию RCP 8.5, в 2021–2050 гг. увеличение годового стока рек бассейна Черного моря составит в среднем 4%, а рек бассейна Азовского моря – в среднем 8%. Увеличение стока в течение периода с ноября по апрель составляет 6% для рек Черного и 14% для рек Азовского морей. Для теплого периода года можно отметить снижение стока Дерекойки, Бурульчи и Тонаса на 17–25%, в то время как для остальных рек изменения $\leq 4\%$ (рис. 4).

При реализации сценария RCP 2.6 в конце XXI в. возможные изменения стока исследуемых рек Крымского п-ова очень схожи с изменениями по этому же сценарию за период 2021–2050 гг. Основное отличие – в теплый период года: увеличение стока рек, за исключением Дерекойки, Бурульчи и Тонаса, в среднем становится более интенсивным – от 15 до 20% (рис. 5). По сценарию RCP 4.5, в конце XXI в. положительные аномалии годового стока рек Черной, Коккозика, Кучук-Узенбаш, Салгир, Бурульчи и Индол – в пределах 5%, а отрицательные аномалии стока рек Дерекойки, Тонас и Кучук-Карасу – 6–9%. В течение теплого периода года отрицательные аномалии стока варьируют от 9 до 34%, постепенно возрастая с юго-запада на северо-восток исследуемой территории горного Крыма (рис. 5). В течение холодного периода года увеличение стока рек, за исключением Дерекойки, составляет 1–25% с наибольшим значением для р. Индол.

По сценарию RCP 6.0, в конце XXI в. вероятно снижение годового стока Дерекойки, Тонаса и Кучук-Карасу на 13–20%, а для остальных рек – в среднем на 6% (рис. 5). Это объясняется интенсивным уменьшением стока в течение теплого периода года на 12–41% в зависимости от водосбора. В период с ноября по апрель отмече-

но увеличение стока только Бурульчи и Индола на 8%, для стока остальных рек характерны отрицательные аномалии с увеличением значений от 5% в юго-западных бассейнах рек до 13% на северо-восточных. Согласно наиболее экстремальному сценарию RCP 8.5, в конце XXI в. вероятно сокращение годового стока рек в бассейнах Черной и Бельбека на 10%, в верховьях Салгира на 8%, Бурульчи на 5%, а на остальных исследуемых реках на 20–30%. При этом интенсивное снижение стока — в течение теплого периода года: в бассейнах Черной и Бельбека на 35%, в верховьях Салгира на 40%, на остальных исследуемых реках на 50–60% (рис. 5). По изменению стока рек за период с ноября по апрель картина более разнородная: увеличение стока Бурульчи на 16%, снижение стока Дерекойки, Тонаса и Кучук-Ка-

расу на 15–20%, для остальных рек аномалии стока находятся в пределах $\pm 5\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием комплекса ECOMAG построены модели формирования среднесуточного стока на единой информационной основе, включая детальные глобальные базы данных характеристик подстилающей поверхности и данные всех действующих станций государственной гидрометеорологической сети, для набора речных бассейнов горного Крыма с минимальным антропогенным влиянием гидротехнических сооружений и населенных пунктов. По данным метеонаблюдений для девяти из десяти рек горного Крыма с площадью водосбора от 10 до 261 км² получены удовлетворительные результаты расчета среднесуточных и среднемесячных расходов воды [3]. Значения критерия KGE варьируют от 0.42 до 0.71 по среднесуточному стоку и от 0.44 до 0.72 по среднемесячному стоку, а критерия PBIAS — от 2 до 36%. Лишь для р. Альмы текущая настройка гидрологической модели не позволяет получить удовлетворительного качества расчеты среднесуточного стока при значительном систематическом завышении стока моделью. Успешно протестированные гидрологические модели использованы для оценки гидрологических последствий будущих изменений климата в XXI в. по данным ансамбля глобальных климатических моделей. Полученные результаты расчетов влияния изменения будущего климата на речной сток в виде карт стали основой компонента “Изменения климата и водный режим рек Крыма в XXI веке” для прототипа “Водная безопасность Крыма”, подготовленного в ИВП РАН.

В целом, оцененные возможные изменения стока при реализации того или иного RCP-сценария на фоне постепенного потепления и увеличения испаряемости связаны с положительными либо отрицательными аномалиями количества осадков, поскольку реакция на схожие изменения количества сезонных осадков у водосборов, расположенных на юго-западе и северо-востоке исследуемой территории горного Крыма, может быть разной не только по величине, но даже по знаку. При реализации любого из RCP-сценариев в ближайшей перспективе на 2021–2050 гг.,

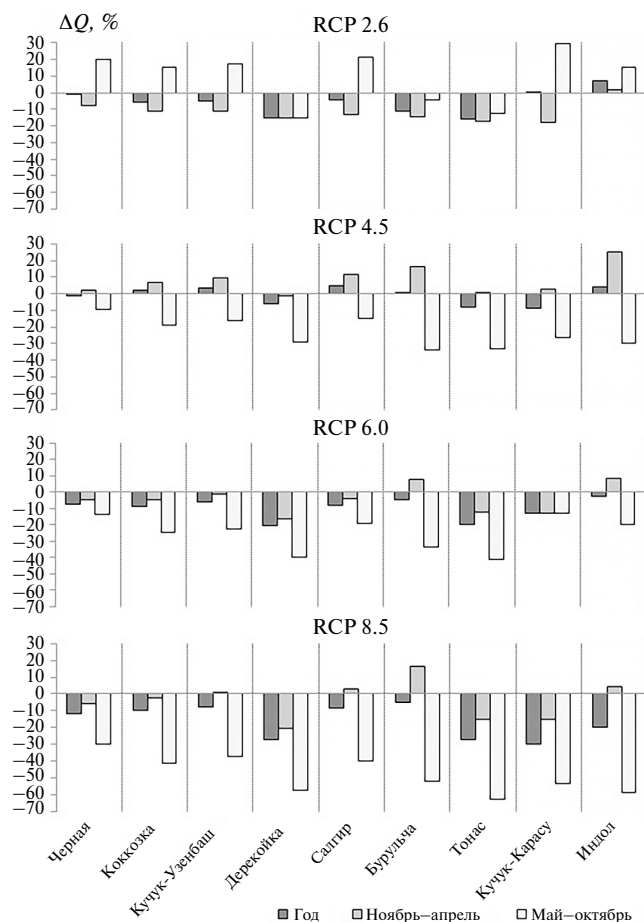


Рис. 5. Аномалии годовых и сезонных величин стока рек горного Крыма согласно результатам гидрологического моделирования на основе данных GCMs при сценариях RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5 в конце XXI в.

равно как и сценариев RCP 2.6 и RCP 4.5 в конце XXI в., дефицит водных ресурсов может наблюдаться в основном в речных бассейнах, расположенных к востоку от верховьев Салгира, впрочем, не достигая катастрофических показателей. Согласно более агрессивным климатическим сценариям RCP 6.0 и RCP 8.5, в конце XXI в. вероятно наибольшее повсеместное сокращение стока рек горного Крыма на фоне интенсивного потепления на 2–3.5°C и снижения количества осадков, особенно в течение теплого периода года — с мая по октябрь на 7–13%, что будет способствовать увеличению дефицита водных ресурсов Крымского п-ова, связанных с речным стоком.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дунаева Е.А., Попович В.Ф., Ляшевский В.И. Анализ динамики количественных и качественных характеристик водных ресурсов с использованием открытых ГИС и агрогидрологических моделей // Науч. журн. РосНИИПМ. 2015. № 1 (17). С. 127–141.
2. Землянкова А.А., Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Федорова А.Д. Моделирование формирования стока горной реки Дерекойки (полуостров Крым) // Сб. докл. междунаро. науч. конф. памяти выдающегося русского ученого Ю.Б. Виноградова “Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению”. СПб.: Изд-во ВВМ, 2020. С. 78–83.
3. Калугин А.С., Мотовилов Ю.Г., Попова Н.О., Миллионщикова Т.Д. Модели формирования стока рек горного Крыма // Свид. гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023687573. 2023. Правообладатель ИВП РАН.
4. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: РАН, 2018. 300 с.
5. Семенов В.А., Алешина М.А. Сценарные прогнозы изменений температурного и гидрологического режима Крыма в XXI веке по данным моделей климата CMIP6 // Вод. ресурсы. 2022. Т. 49. № 4. С. 506–516.
6. Gelfan A.N., Gusev E.M., Kalugin A.S., Krylenko I.N., Motovilov Y.G., Nasonova O.N., Millionshchikova T.D., Frolova N.L. Runoff of Russian rivers under current and projected climate change. Rev. 2. Climate change impact on the water regime of Russian rivers in the XXI century // Water Resour. 2022. V. 49. № 3. P. 351–365.
7. Gelfan A.N., Kalugin A.S., Motovilov Y.G. Assessing Amur water regime variations in the XXI century with two methods used to specify climate projections in river runoff formation model // Water Resour. 2018. V. 45. № 3. P. 307–317.
8. Gupta H.V., Kling Y., Yilmaz K.K., Martinez G.F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modeling // J. Hydrol. 2009. V. 377. № 1–2. P. 80–91.
9. Hempel S., Frieler K., Warszawski L., Schewe J., Piontek F. A trend-preserving bias correction – the ISI-MIP approach // Earth System Dynamics. 2013. V. 4. P. 219–236.
10. Kalugin A. Future climate-driven runoff change in the large river basins in Eastern Siberia and the Far East using process-based hydrological models // Water. 2022. V. 14(4). № 609. P. 1–22.
11. Kalugin A.S. River runoff in European Russia under global warming by 1.5 and 2 degrees // Water Resour. 2023. V. 50. № 4. P. 543–556.
12. Poggio L., de Sousa L.M., Batjes N.H., Heuvelink G.B.M., Kempen B., Ribeiro E., Rossiter D. SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty // Soil. 2021. V. 7. P. 217–240.
13. Svisheva I.A., Anisimov A.E. Numerical Modeling of Extreme Flash Flood in Yalta in September 2018 // Ecol. Safety Coastal and Shelf Zones of Sea. 2022. V. 3. P. 43–53.
14. Takaku J., Tadono T., Doutsu M., Ohgushi F., Kai H. Updates of “AW3D30” ALOS global digital surface model with other open access datasets // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2020. P. 183–189.
15. Zhang X., Liu L., Chen X., Gao Y., Xie S., Mi J. GLC_FCS30: Global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery // Earth System Sci. Data. 2021. V. 13. P. 2753–2776.

MODELING OF RIVER RUNOFF FORMATION IN THE MOUNTAINOUS CRIMEA UNDER CURRENT AND PROJECTED CLIMATE CONDITIONS

A. S. Kalugin*, Yu. G. Motovilov, N. O. Popova, T. D. Millionshchikova

Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119333 Russia

**e-mail: andrey.kalugin@iwp.ru*

The ECOMAG runoff formation model was used to calculate physically based changes in the water regime of the rivers of the mountain Crimea in the XXI century using data from an ensemble of climatic models taking into account various global warming scenarios. The objects of the study were the rivers Chernaya, Belbek, Derekoika, Alma, Salgir, Burulcha, Tonas, Kuchuk-Karasu, and Indol. Models of natural river flow formation for the specified set of river basins were developed on the basis of homogeneous sources of information on hydrometeorological regime and land surface parameters. The hydrological models were verified by comparing actual and calculated daily and monthly water discharges at different hydrometric stations over a multi-year period. Then, the hydrological models were used to estimate scenario future changes in river runoff for a year, conditionally warm and cold seasons of the year using data from an ensemble of global climate models relative to the base period 2006–2020. Under the realization of any of the RCP scenarios in the near-term perspective for 2021–2050, as well as under RCP 2.6 and RCP 4.5 scenarios at the end of the XXI century, water resources deficit can be observed mainly in the river basins located to the east of the Salgir headwaters, however, without reaching catastrophic indicators. According to more aggressive climatic scenarios RCP 6.0 and RCP 8.5, at the end of the XXI century, the greatest reduction of river flow in the mountainous Crimea is likely, which will contribute to the development of water scarcity at the expense of atmospheric sources.

Keywords: river runoff, Crimea, climate change, modeling