

УДК 556.512

ВОДНЫЙ БАЛАНС КРЫМА ЗА 2001–2021 гг. ПО НАЗЕМНЫМ И ДИСТАНЦИОННЫМ ДАННЫМ¹

© 2024 г. В. Ю. Григорьев^{a, b, *}, А. Г. Косицкий^a, Н. Л. Фролова^{a, **}

^aМГУ им. М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, 119991 Россия

^bИВП РАН, Москва, 119333 Россия

*e-mail: vadim308g@mail.ru

**e-mail: frolova_nl@mail.ru

Поступила в редакцию 15.03.2024 г.

После доработки 07.05.2024 г.

Принята к публикации 17.05.2024 г.

Для территории Крыма и/или ряда его речных бассейнов за 2001–2021 гг. получены оценки осадков, испарения, речного стока, испаряемости и составляющих бассейновых влагозапасов. Период 2014–2021 гг. отличался большей аридностью по сравнению с 2001–2013 гг., а именно снижением слоя осадков и речного стока и ростом слоя испаряемости. Баланс руслового стока имеет тенденцию к снижению от верхних частей водосбора к нижним. Исключение составляет бассейн Бельбека, где область потерь стока приходится на среднюю часть водосбора. Анализ изменения измеренного и климатического стока за два периода показал рост потерь стока, не связанных с испарением, на многих горных и предгорных участках, что, вероятно, связано с уменьшением притока подземных вод и ростом величины водозабора. При этом возможно, что для равнинных частей водосборов рек Альмы, Черной, Бельбека и Качи, а также верховий Салгира произошел рост речного стока в результате эксплуатации подземных вод и дальнейшего попадания сточных вод в реки. Снижение стока в пределах бассейна Салгира на 0–40 мм может быть частично объяснено перекрытием Северо-Крымского канала в 2014 г. Оценка снижения запасов подземных вод на территории Крыма за 2003–2020 гг. составила порядка 150 мм.

Ключевые слова: Крым, открытый водный баланс, речной сток, подземный сток, хозяйственное воздействие, MODIS.

DOI: 10.31857/S0321059624060081 EDN: VOOJPY

ВВЕДЕНИЕ

Крым и Севастополь — одни из наиболее водоемких регионов РФ, чьи потребности могут быть обеспечены лишь за счет местных водных ресурсов. Эффективное управление водными ресурсами полуострова требует информации о их пространственном распределении и характере многолетней изменчивости. Однако задача оценки возобновляемых водных ресурсов Крыма, представленных речным R и подземным G стоком, и других составляющих водно-

го баланса, осадков P , испарения E , изменения влагозапасов $TWSC$ осложнена рядом факторов: сильной неравномерностью условий формирования стока и недостаточно плотной сетью метеостанций, несовпадением подземных и поверхностных водосборов рек, значительной площадью орошаемых земель, переброской стока по Северо-Крымскому каналу до 2014 г. и использованием невозобновляемых запасов подземных вод. Эти факторы приводят к тому, что использование упрощенного уравнения водного баланса речного водосбора за многолетний период для многих рек Крыма не обосновано.

¹ Работа проведена в рамках госзадания кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (ч. 2 темы I.10 “Анализ, моделирование и прогнозирование изменений гидрологических систем, водных ресурсов и качества вод суши”). Климатический анализ проведен в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ им. М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды” (программа “Климат и окружающая среда”). Часть данных собрана и обработана в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема FMWZ-2022-0001).

Согласно [2, 6], годовая сумма осадков на территории Крыма составляет 516 мм, колеблясь от 303 до 1214 мм по территории, с тенденцией к росту с высотой местности — в среднем на 58 мм/год/100 м. Отметим, однако, что в Крыму имеются лишь 3 метеостанции с многолетними рядами наблюдений, расположенными на высоте >300

м. Также P имеет значительную временную изменчивость, особенно в степных и полупустынных районах. Оценка среднего годового стока крымских рек находится в широких пределах — от 0.37 до 2 км³/год, однако большая часть оценок находится в диапазоне от 0.83 до 1 км³/год, т. е. 31–37 мм/год [8]. Объем переброски стока по Северо-Крымскому каналу в Крым до 2014 г. составлял порядка 1.5–1.7 [2] или 2.3 км³/год [8], 70–80% которой расходовалось на орошение. Величина испарения оценивается в 480 мм/год и составляет порядка 93% годовой суммы осадков [6].

Малый размер речных бассейнов и сложное геологическое строение территории приводят к тому, что поверхностный и подземный водосборы рек могут существенно различаться. При этом одни водосборы выступают в качестве областей питания подземных вод, поскольку часть подземного стока проходит транзитом и не полностью дренируется местной гидрографической сетью, а другие в качестве областей их разгрузки [7]. Несовпадения поверхностного и подземного водосборов — распространенное явление. Так, в [9] для водосборов Америки, Европы и Австралии значимое несовпадение выявлено для 36.2% всех постов. При этом водосборы, расположенные в аридном климате и ближе к морю, как правило, теряли речной сток. По мере роста площади речного бассейна и его среднего уклона разница между поверхностным и подземным водосборами уменьшалась.

Земли сельскохозяйственного назначения занимают 69% территории Крыма [6], при этом после 2013 г. произошло существенное изменение объемов воды как потребляемой в сельском хозяйстве, так и в составе выращиваемых культур. Неопределенность объема воды, расходуемой на полив, и состава выращиваемых культур затрудняют использование моделей поверхностного слоя для оценки испарения в пределах отдельных речных водосборов. Оценка E возможна на основе данных дистанционного зондирования, в частности сенсоров MODIS, установленных на спутниках Terra и Aqua. MODIS зачастую систематически занижают E [3]. Несмотря на большую по сравнению с рядом других продуктов случайную ошибку, помимо пространственного разрешения преимущество MODIS перед мо-

дельными решениями — расчет испарения независимо от данных по осадкам и орошению, что позволяет рассчитывать его и для орошаемых территорий.

Цель данной работы — оценка роли подземных вод, изменения влагозапасов и переброски стока в водном балансе речных бассейнов Крыма за 2001–2021 гг.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Информация о расходах воды взята из соответствующих выпусков гидрологических ежегодников и системы АИС ГМВО. В работе использованы данные о годовом стоке на 29 гидрологических постах за 2001–2021 гг., при этом отсутствовали данные измерений за 2011–2013 гг. Медианный размер водосбора составил 83.6 км² с минимумом в <1 км² и максимумом 3540 км² (табл. 1).

Малая густота сети наблюдений за осадками и пропуски в рядах на территории Крыма за 2001–2021 гг. не дают возможности оценить пространственное распределение слоя осадков для двух периодов с достаточной детальностью. По этой причине для оценки слоя осадков комбинировались данные проекта WorldClim2 по нормам месячных сумм осадков, полученных по данным наземных наблюдений за 1970–2000 гг. [4], и данных реанализа ERA5 по месячным суммам осадков за 1970–2021 гг. [1]. Для расчета слоя осадков за 2001–2013 гг. слой осадков за 1970–2000 гг. по данным WorldClim2 умножался на отношение слоя осадков за 2001–2013 гг. к слою осадков за 1970–2000 гг. по усредненным по всей территории Крыма данным об осадках ERA5. Таким образом, слои осадков за два периода различаются на постоянный множитель, одинаковый для всей территории Крыма.

Для оценки величины испарения E и испаряемости PET за 2001–2021 гг. использовались данные MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), в частности версия MOD16A3GFv061, полученная со спутника Terra, и версия MYD16A3GFv061, полученная со спутника Aqua за 2003–2021 гг. Одно из преимуществ использования данных с обоих спут-

Таблица 1. Площади речных бассейнов, средние слои стока за 2001–2010 гг. R_1 и 2014–2021 гг. R_2 и его изменение ΔR для рек Крыма

Река–пост	Площадь, км ²	R_1 , мм	R_2 , мм	ΔR , %
р. Альма – выше вдхр Партизанское	184	228	177	-22.3
р. Альма – пгт Почтовое	374	48	30	-37.9
р. Кача – с. Суворово	525	64	50	-22.4
р. Бельбек – пгт Куйбышево	270	213	168	-21.0
р. Бельбек – с. Фруктовое	493	130	109	-16.4
р. Биюк-Узенбаш – с. Счастливое	6.55	1180	1035	-12.3
р. Кучук-Узенбаш – с. Многогоречье	10	602	517	-14.1
Приток р. Кучук-Узенбаш – с. Многогоречье	<1	7412	5914	-20.2
р. Коккозка – с. Аромат	83.6	501	414	-17.3
р. Черная – с. Хмельницкое	342	181	136	-24.9
р. Учан-Су – г. Ялта	16.8	421	369	-12.2
р. Дерекойка – г. Ялта	49.7	428	309	-28.0
р. Демерджи – г. Алушта	53	167	106	-36.8
р. Улу-Узень – с. Солнечногорское	32.5	418	235	-43.9
р. Ускут – с. Приветное	42.3	108	26	-75.6
р. Ворон – с. Ворон	10.3	151	21	-86.1
р. Ай-Серез – с. Междуречье	12.8	63	52	-17.8
р. Таракташ – г. Судак	156	41	5	-88.9
руч. Кизилташский – пгт Щебетовка	35	53	21	-60.8
р. Су-Индол – с. Тополевка	71	155	46	-70.5
р. Салгир – с. Пионерское	261	132	131	-0.9
р. Салгир – с. Лиственное	3540	31	7	-78.9
р. Ангара – с. Перевальное	38.3	247	182	-26.5
р. Малый Салгир – г. Симферополь	96	99	75	-24.4
р. Бурульча – с. Межгорье	85	216	172	-20.3
р. Биюк-Карасу – с. Зыбины	601	122	94	-22.9
р. Биюк-Карасу – с. Заречье	1140	49	28	-42.9
р. Кучук-Карасу – с. Богатое	89	136	47	-65.4
р. Черная – с. Родниковское	47	1620	1288	-20.5

ников – их различное время пролета над территорией Крыма, что снижает возможную величину систематической ошибки. Пространственное разрешение обоих архивов составляет 500 м. Для оценки E и PET данные MOD16A3GFv061 и MYD16A3GFv061 усреднялись.

Использованные архивы данных MODIS не включают в себя данные с урбанизированных и заболоченных территорий, снежного покрова, оголенной почвы и водной поверхности.

В основе расчета испарения по данным MODIS лежит уравнение теплового баланса в форме Пенманна–Монтиса [10]. При этом для расчета используются такие параметры, определяемые по спутниковым наблюдениям, как тип растительного покрова, площадь листового покрытия, состояние растительного покрова (NDVI), доля поглощенной фотосинтетически активной радиации, поверхностная температура. Ряд других параметров в рамках использованных продуктов получен по данным погодного реанализа NCEP-

DOE.

Информация об общих бассейновых влагозапасах и их отдельных составляющих получена по данным проекта Global Gravity-based Groundwater Product (G3P) [5], предоставляющего информацию об общих влагозапасах территории (TWS), запасов подземных вод (GW), почвенных вод, сезонного снежного покрова и поверхностных вод. В основе данных G3P лежат данные проекта GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment). Случайная ошибка данных GRACE по среднемесячным величинам TWS для территорий площадью порядка 100 тыс. км² составляет ~15 мм. В силу относительно небольшой площади Крыма возможно занижение амплитуды колебаний TWS , связанное с утечкой ("leakage") части сигнала. Однако, поскольку часть соседних точек — поверхность моря, вероятно, что значительная часть сигнала была восстановлена при коррекции. Для определения отдельных составляющих влагозапасов в рамках G3P используется ряд продуктов, комбинирующих данные спутникового зондирования, моделирования и наземных наблюдений.

В условиях отсутствия детальной гидрогеологической информации выявление зон формирования и разгрузки подземных вод возможно с использованием уравнения водного баланса за многолетний период:

$$R_{\text{клим}} = P - E, \quad (1)$$

где $R_{\text{клим}}$ — климатический сток. При этом уточненное уравнение водного баланса при учете возможного транзита подземных вод, изменения влагозапасов и переброски стока включает три дополнительных члена:

$$R = P - E + G - TWSC + R_{\text{пер}}, \quad (2)$$

где G — баланс потока подземных вод, не дренируемых гидрографической сетью, в пределах водосбора, при $G > 0$ в пределы водосбора притекает больше подземных вод, чем вытекает; $TWSC$ — изменение общих бассейновых влагозапасов в пределах водосбора; $R_{\text{пер}}$ — баланс объема переброшенного стока из-за пределов речного бассейна и объема переброски стока за пределы

речного бассейна. Тогда разница между фактическим и климатическим стоком ($R_{\text{факт-клим}}$) равна

$$R_{\text{факт-клим}} = R_{\text{клим}} - R = G - TWSC + R_{\text{пер}}, \quad (3)$$

а разница в величинах $R_{\text{факт-клим}}$ ($\Delta R_{\text{факт-клим}}$) за какие-либо два периода составляет

$$\Delta R_{\text{факт-клим}} = \Delta G - \Delta TWSC + \Delta R_{\text{пер}}, \quad (4)$$

где ΔG , $\Delta TWSC$ и $\Delta R_{\text{пер}}$ — изменение G , ΔG , $TWSC$ и $R_{\text{пер}}$ за какой-либо период соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В целом период 2014–2021 гг. отличается меньшим (на 5.2%) слоем осадков P по сравнению с 2001–2013 гг. При этом основные закономерности пространственного распределения P связаны с рельефом. Величины осадков >600 мм характерны для территорий с высотой >600 м. В пределах зоны с высотой >300 м $P > 450$ мм. Для большей части степного Крыма P меняется в диапазоне от 320 мм до 400 мм. Отметим, что полученные величины слоя осадков для территории горного Крыма, вероятно, занижены.

Величина PET относительно равномерно распределена по территории степного Крыма, колеблясь в пределах от 1250 до 1400 мм, с максимумом для района к северу от Бахчисарая и минимумом на Керченском п-ове. Минимум PET (1150–1200 мм) в значительной степени приходится на высотные отметки от 300 до 600 м. Второй период отличается большими величинами PET , однако величина изменений не была однородна. Максимальный рост на 4–6% замечен для территории Керченского п-ова и северо-восточного берега Крыма (рис. 1). Для центральной части степного Крыма и юго-западной оконечности полуострова рост составил 2–4%. Для территории горного и предгорного Крыма рост оказался незначительным, составив 0–2%. На северо-западе Крыма изменения PET практически нет.

Как и для большинства территорий с засушливым климатом, пространственное распределение E следует за распределением P , которое, в свою очередь, связано с высотой местности.

Ряд локальных максимумов E приурочен к границе лесной и травянистой растительности, вероятно, вследствие ошибок определения границ типов растительности в продуктах MODIS. В степной части Крыма испарение практически равно осадкам, т. е. составляет порядка 350 мм. В горных и предгорных районах слой испарения составляет от 800 мм на юго-западе до 650 мм на северо-востоке. При анализе изменения E за два периода складывается парадоксальная ситуация, когда районы наибольшего уменьшения E совпадают с районами максимального роста PET (рис. 2).

Поскольку на большей части Крыма величина испарения лимитирована количеством доступной влаги, положительные аномалии P сопровождаются положительными аномалиями E . Наиболее заметные изменения — роста PET и снижения E в северо-восточной части Крыма и Керченского п-ова — вероятно, связаны с прекращением полноценного функционирования Северо-Крымского канала в 2014 г. Уменьшение интенсивности орошения и питания подземных вод речными водами, помимо уменьшения количества доступной для испарения влаги, могло привести к перераспределению потоков явного и скрытого тепла, в частности — к росту поверхностной температуры, что приводит к росту испаряемости для этой территории.

В силу физико-географических особенностей Крыма основной источник изменчивости общих влагозапасов — подземные воды, запас которых с 2014 г. имеет тенденцию к снижению (рис. 3). При этом период с 2003 по 2006 г. наиболее многоводный. Период с 2007 по 2015 г. отличается пониженными величинами GW , однако тенденции к направленному снижению не прослеживается. Заметное направленное изменение GW прослеживается лишь с 2017 г. За 5 лет величина GW уменьшилась на ~150 мм, т. е. 30 мм/год, что сопоставимо со слоем стока рек Крыма. Уменьшение GW относительно максимума 2005–2006 гг. составило уже >0 мм.

Вторая компонента по величине вклада в общую изменчивость TWS — почвенная влага. Динамика запасов почвенных вод в Крыму отличается более выраженным, по сравнению

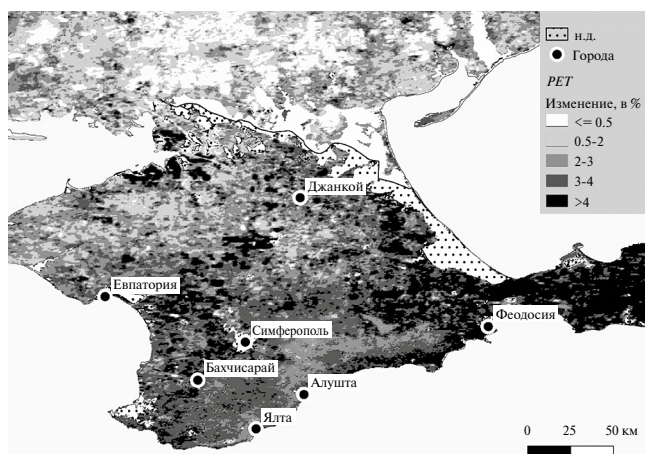


Рис. 1. Изменение PET в 2014–2021 гг. по сравнению с 2001–2013 гг.

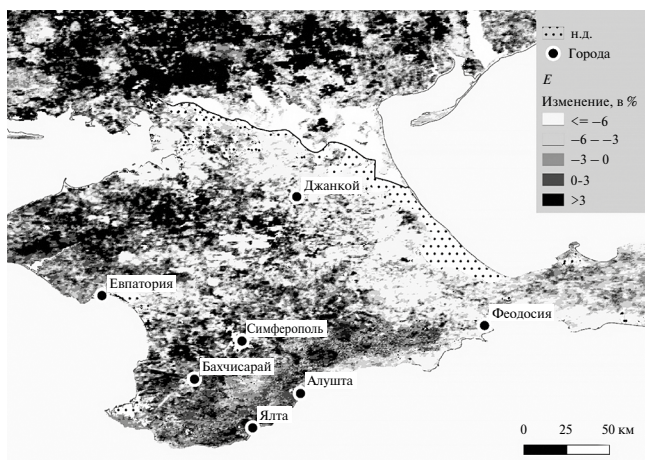


Рис. 2. Изменение E в 2014–2021 гг. по сравнению с 2001–2013 гг.

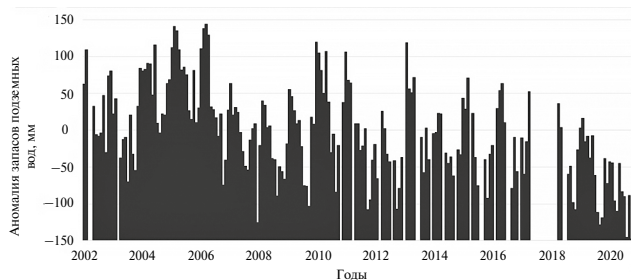


Рис. 3. Аномалии запаса подземных вод в Крыму за 04.2002–12.2020 относительно среднего за этот период. Белые полосы — пропущенные значения (по данным [5]).

с GW , сезонным ходом, что, однако, частично связано с меньшей ошибкой в их определении. Динамика почвенных вод близка к динамике GW — максимум в 2003–2006 гг. и некоторое снижение в 2017–2020 гг. При этом снижение

за 2017–2020 гг. может быть связано как с дефицитом осадков, так и с уменьшением площади орошаемых земель. Вместе с тем направленная тенденция к изменению почвенных вод за весь рассматриваемый период отсутствует. Преобладает сезонный ход с размахом колебаний 60–100 мм. Изменчивость запасов воды в снеге и поверхностных вод не вносит существенного вклада в изменчивость TWS . Так, максимальный среднемесячный запас воды в снеге за рассматриваемый период – от 2 до 11 мм. Размах аномалий запасов поверхностных вод составил от –4 до 9 мм.

Величина годового стока рек Крыма отличается высокой изменчивостью (табл. 1). Из-за несовпадения поверхностных и подземных водосборов на территории Крыма максимальная величина слоя стока практически не ограничена. Так, на одном из безымянных притоков р. Кучук-Узенбаш он >7400 мм. При этом наблюдается тенденция уменьшения слоя стока по мере роста площади речного бассейна, т. е. сток рек практически полностью формируется в их верховьях. На всех 29 рассмотренных гидрологических постах выявлено снижение годового стока за второй период (2014–2021 гг.) по сравнению с первым (2001–2010 гг.). Наименьшее снижение выявлено для верховий р. Салгир (с. Пионерское), где оно составило лишь 0.9%. Однако медианная величина снижения равна уже 24%, а максимум достигает 89% на р. Таракташ. При этом величина изменения стока отличается существенной пространственной неоднородностью. Так, расстояние между центрами водосборов рек Учан-Су и Дерекойка составляет ~8.5 км при разнице изменения слоя стока в 15.8%.

Более детальное представление об изменении слоя стока дают величины, рассчитанные для частных водосборов, т. е. участков речных бассейнов, расположенных между гидрологическими постами. Слой стока для частного водосбора рассчитывается как отношение изменения расхода воды на участке к площади частного водосбора. Наибольшие величины слоя стока приурочены к вершинам крымских яйл и ЮБК. На высотах <300 м преобладает потеря стока. Это связано как с уменьшением слоя осадков, так и с возрастающей антропогенной нагрузкой в

нижних частях речных бассейнов. Так, в районе р. Альма – пгт Почтовое, включающего Партизанское водохранилище, потери стока за первый период составляют 126 мм/год, что эквивалентно потерям 24 млн м³/год. Наибольшие потери стока в абсолютном выражении выявлены на р. Биюк-Карасу на участке между селами Заречье и Зыбины, где они достигли 29.6 млн м³/год. Наибольший объем речного стока среди выделенных частных водосборов наблюдается на р. Черная – с. Родниковское, где годовой объем стока составляет 76.1 млн м³.

Некоторое нарушение закономерности снижения стока с высотой речного бассейна – р. Бельбек, где область потерь стока приурочена к центральной части речного бассейна на участке выше пгт Куйбышево, где потери составляют 31 мм/год. На нижнем участке до с. Фруктового величина стока Бельбека растет на 30 мм/год. Вероятно, это связано с особенностями гидрогеологического строения – потерями стока на питание подземных вод русловыми в центральной части водосбора и их последующей разгрузкой в нижней.

Второй период (2014–2021 гг.) отличается практически повсеместным снижением стока (рис. 4), особенно в области его формирования.

Основная причина преимущественно снижения потерь стока в нижних частях речных бассейнов – снижение поступления стока с верхних частей водосбора, что ведет к уменьшению

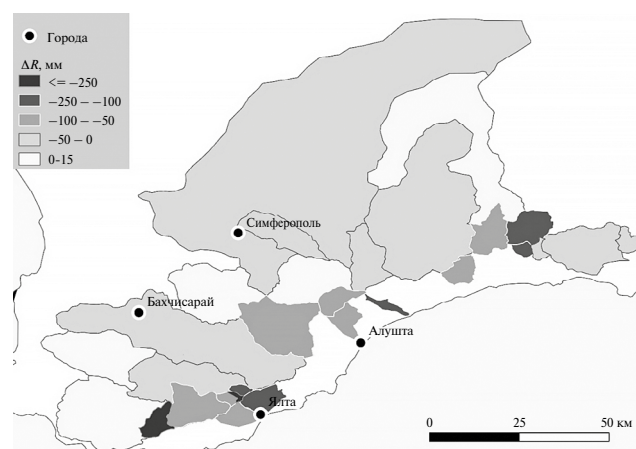


Рис. 4. Изменение R в 2014–2021 гг. по сравнению с 2001–2013 гг.

потерь воды в русле. При этом снижение потерь стока не превышает нескольких миллиметров. Так, на р. Черной на участке выше с. Хмельницкого потери стока уменьшились на 0.8 мм, а на р. Биюк-Карасу выше с. Заречье — на 1.5 мм. Значительное уменьшение потерь произошло лишь на участке р. Альмы выше пгт Почтового, где оно составило 13.4 мм. Однако на двух участках величина потерь возросла — в среднем течении Бельбека на 8.9 мм, и в нижнем течении Салгира на 29.1 мм. Рост потерь в нижнем течении Салгира (с 3.9 до 33.1 мм) и значительная площадь этой части водосбора (порядка 1950 км²) привели к тому, что в 2014–2021 гг. этот район был областью наибольших потерь стока, достигших 64.7 млн м³ в год.

В связи с наличием систематических ошибок в данных по осадкам и испарению, прежде всего занижение слоя осадков в пределах горного Крыма, для большинства речных бассейнов климатический сток (1) оказался отрицательным со средней величиной –15 мм/год. Исключение составляет бассейн Салгира и ряд рек в районе г. Ялты. При допущении того, что величина систематической ошибки не меняется со временем, разница между величинами климатического стока за два периода не должна иметь систематической ошибки. Изменение климатического стока оказалось близко к изменению фактического. Максимальное сокращение климатического стока получено для рек Дерекойки и Учан-Су и составило ~40 мм. Рост климатического стока выявлен лишь для двух водосборов, и он ≤2 мм.

Наибольшие различия между измеренным и климатическим стоком наблюдаются в пределах горного Крыма и ЮБК. Вероятная причина этого для малых водосборов площадью <50 км² — большая площадь подземных водосборов по сравнению с площадью поверхностных. Для более крупных частных водосборов горного Крыма существенную роль в различии климатического и измеренного стока играет занижение климатического стока за счет занижения слоя осадков. Для водосборов степного и предгорного Крыма различия между фактическим и климатическим стоком меньше, однако также для этих районов меньше величина систематической ошибки слоя осадков. Для большей части бассейнов Салгира

и Альмы ниже Партизанского водохранилища, расположенных преимущественно в степной и предгорной зонах, фактический сток меньше климатического. Частично это обусловлено тем, что Партизанское водохранилище используется для водоснабжения Симферополя, т. е. выполняется переброска стока за пределы бассейна Альмы. Кроме того, используемые в исследовании величины испарения не включают испарение с водной поверхности и, таким образом, могут завышать величину климатического стока для территорий с прудами и водохранилищами за счет занижения слоя испарения. Как и для р. Альмы, для р. Салгир разница между климатическим и фактическим стоком может быть связана с тем, что подземный сток, формирующийся в пределах речного бассейна, покидает его пределы, минуя русловую сеть. Вероятно, в пределах их водосборов происходят потеря руслового стока на инфильтрацию и пополнение запасов подземных вод, которые в дальнейшем покидают пределы речных бассейнов, также минуя русловую сеть. В среднем для рассматриваемой территории измеренный сток превысил климатический на 78 мм за первый период и на 60 мм во второй период. При этом, если в бассейне Салгира климатический сток превышает измеренный (рассчитанный для частных водосборов) на 50–100 мм, то для большинства других речных бассейнов измеренный сток превышает климатический на 100–300 мм. Более равномерное пространственное изменение климатического стока по сравнению с изменением измеренного стока, вероятно, связано с недоучетом неравномерного пространственного изменения слоя осадков при расчете климатического стока, что наиболее сильно сказывается на малых водосборах, где различие максимально. Изменение за два периода разницы фактического и климатического стока $\Delta R_{\text{факт-клим}}$ (4) показывает, что наибольшие изменения затронули малые горные водосборы (рис. 5).

Рост $R_{\text{факт-клим}}$ во второй период по сравнению с первым был выявлен для большей части бассейнов Альмы, Качи, Бельбеки, Черной, а также верховий Салгира. На остальной части бассейна Салгира, а также на водосборах рек, расположенных восточнее, снижение $R_{\text{факт-клим}}$ достигало 40 мм. Снижение $R_{\text{факт-клим}}$ может быть связано

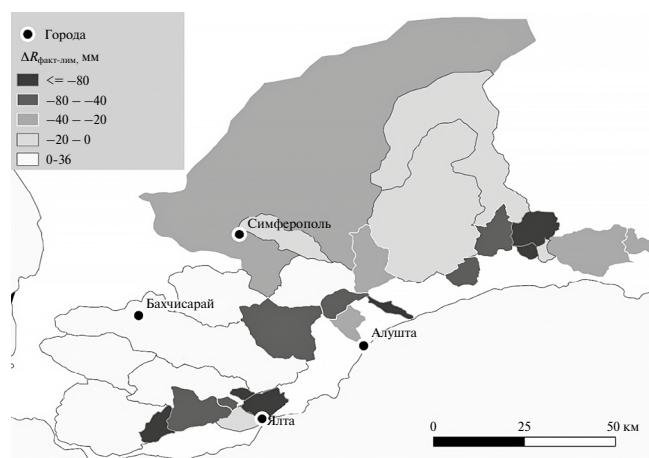


Рис. 5. Изменение $\Delta R_{\text{факт-клим}}$ (4) в 2014–2021 гг. по сравнению с 2001–2013 гг.

как со снижением объемов подземного питания, поступающего из-за пределов речного бассейна, так и с переброской стока за пределы речного бассейна, в том числе и сброса сточных вод ниже створов гидрологических постов или в пределах территории, не освещенной данными гидрологических наблюдений. О влиянии безвозвратных потерь воды, не связанных с испарением, говорит разница $R_{\text{факт-клим}}$ между соседними водосборами рек Дерекойки и Учан-Су — 81 мм и 15 мм соответственно. Рост $R_{\text{факт-клим}}$ на юго-западе рассматриваемой территории может быть связан со снижением бассейновых влагозапасов за счет роста величины подземного водозабора после 2014 г. и соответствующего снижения запасов подземных вод. Однако снижение влагозапасов бассейнов юго-запада Крыма может быть связано и с естественными причинами — сработкой запасов подземных вод в результате снижения питания подземных вод во второй период, вызванного дефицитом осадков. Снижение $R_{\text{факт-клим}}$ в бассейне Салигра может быть связано со снижением поступления воды по Северо-Крымскому каналу в 2014 г.

ВЫВОДЫ

Период 2014–2021 гг. отличается большей засушливостью по сравнению с 2001–2013 гг., а именно снижением слоя осадков и ростом слоя испаряемости. Величина слоя осадков за второй период была в среднем на 5% меньше, чем за первый. Изменения испарения в силу засушливости

климата в значительной степени следовали за изменением осадков. При этом наиболее заметное уменьшение испарения выявлено для территории Северо-Крымского канала. По данным проекта ГЗР оценено снижение запасов подземных вод за 2014–2020 гг., составившие ~150 мм. Наибольшие величины речного стока наблюдаются в пределах горного и предгорного Крыма, однако в силу несовпадения подземных и поверхностных водосборов слой стока может меняться в широких пределах. Баланс руслового стока имеет тенденцию к снижению от верхних частей водосбора к нижним. Исключение составляет бассейн Бельбека, где область потерь стока приходится на среднюю часть водосбора. Анализ изменения измеренного и климатического стока за два периода показал рост потерь стока, не связанных с испарением, на многих горных и предгорных участках, что, вероятно, связано с уменьшением подземного питания с территории за пределами речных бассейнов и ростом величины водозабора. При этом возможно, что для равнинных частей водосборов рек Альмы, Черной, Бельбек и Качи, а также верховий Салигра произошел рост речного стока за счет откачки подземных вод. Снижение стока в пределах бассейна Салигра на 0–40 мм может быть частично объяснено перекрытием Северо-Крымского канала в 2014 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Степаненко В.М. Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения осадков реанализом ERA5 на территории России // Изв. РАН. Сер. географическая. 2022. Т. 86. № 3. С. 435–446.
2. Chao L., Zhang K., Wang J., Feng J., Zhang M. A Comprehensive Evaluation of Five Evapotranspiration Datasets Based on Ground and GRACE Satellite Observations: Implications for Improvement of Evapotranspiration Retrieval Algorithm // Remote. Sens. 2021. V. 13. № 12. 2414. <https://doi.org/10.3390/RS13122414>
3. Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas // Int. J. Climatol. 2017. V. 37. P. 4302–4315.
4. Gorbunov R., Gorbunova T., Kononova N., Priymak A., Salnikov A., Drygval A., Lebedev Ya. Spatiotemporal aspects of interannual changes precipitation in the crimea // J. Arid Environ. 2020. 183:104280.

5. Güntner A., Sharifi E., Haas J., Ruz Vargas C., Kidd R. Global Gravity-based Groundwater Product. 2023. <https://doi.org/10.3030/870353>
6. Gusev E.M., Dzhogan L.Y., Nasonova O.N. Water Safety of the Steppe Crimea and the Possible Ways to Its Improvement // *Water. Resour.* 2022. V. 49. № 4. P. 543–554.
7. Kampf S.K., Burges S.J., Hammond J.C., Bhaskar A., Covino T.P., Eurich A., Harrison H., Lefsky M., Martin C., McGrath D., Puntenney-Desmond K., Willi K. The Case for an Open Water Balance: Re-envisioning Network Design and Data Analysis for a Complex, Uncertain World // *Water. Resour. Res.* 2020. V. 56. № 6. 56:e2019WR026699.
8. Kositskii A.G., Bogutskaya E.M., Grechushnikova M.G., Grigor'ev V.Yu., Sazonov A.A., Kharlamov M.A., Frolova N.L. Assessing the Local Renewable Water Resources in the Crimean Peninsula // *Water. Resour.* 2022. V. 49. № 4. P. 582–594.
9. Liu Y., Wagener T., Beck H.E., Hartmann A. What is the hydrologically effective area of a catchment? // *Environ. Res. Lett.* 2020. V. 15. № 10. 15:104024.
10. Running S.W., Mu Q., Zhao M., Moreno A. User's Guide MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (MOD16A2/A3 and Year-end Gap-filled MOD16A2GF/A3GF) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (For Collection 6) Version 2.2. 2019.

WATER BALANCE OF CRIMEA FOR 2001–2021 BASED ON GROUND AND REMOTE SENSING DATA

V. Yu. Grigorev^{a, b, *}, A. G. Kositskii^a, N. L. Frolova^{a, **}

^a*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Moscow, 119991, Russia*

^b*Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119333, Russia*

*e-mail: vadim308g@mail.ru

**e-mail: alexhydro@mail.ru

Estimates of precipitation, evaporation, river runoff, potential evaporation and components of basin water storage were obtained for the territory of Crimea and a number of its river basins for 2001–2021. The period 2014–2021 was characterized by greater aridity compared to 2001–2013, namely a decrease in the precipitation and river runoff and an increase in the evapotranspiration. The streamflow balance tends to decrease from the upper parts of the catchment to the lower parts. The exception is the Belbek basin, where the area of runoff losses falls on the middle part of the catchment. Analysis of changes in measured and climatic runoff for two periods showed an increase in non-evaporation runoff losses in many mountainous and foothill areas, which is probably related to a decrease in groundwater inflow and an increase in water withdrawal. At the same time, it is possible that for the plain parts of the catchments of the Alma, Chernaya, Belbek and Kacha rivers, as well as the upper reaches of the Salgir, there was an increase in river runoff as a result of groundwater exploitation and further wastewater inflow into the rivers. The decrease in runoff within the Salgir basin by 0–40 mm can be partially explained by the closure of the North Crimean Canal in 2014. The estimated decrease in groundwater storage within the Crimea for 2003–2020 was of the order of 150 mm.

Keywords: Crimea, open water balance, river runoff, groundwater runoff, human impact, MODIS