



ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ

Журнал освещает теоретические и прикладные проблемы изучения природных вод: формирование водных ресурсов и управление ими, динамику водной среды, качество и охрану вод, гидрохимические и гидроэкологические процессы в водных объектах.



НАУКА

— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Том 51, номер 6, 2024

Гидрологические проблемы вододефицитных регионов

Оценка качества воспроизведения метеорологических характеристик несколькими моделями атмосферного реанализа на территории Крымского полуострова <i>В. М. Морейдо, П. Н. Терский, Д. В. Абрамов</i>	731
Оценка составляющих речного стока Горного Крыма. 1. Сток малых рек <i>Т. С. Губарева, Г. Н. Амеличев, Б. И. Гарцман, С. В. Токарев, Б. А. Вахрушев, В. Г. Науменко, Е. Г. Амеличев, И. Б. Вахрушев</i>	743
Оценка составляющих речного стока Горного Крыма. 2. Сток карстовых водоносных систем <i>Т. С. Губарева, Г. Н. Амеличев, С. В. Токарев, Б. А. Вахрушев, Б. И. Гарцман, В. Г. Науменко, Е. Г. Амеличев, И. Б. Вахрушев</i>	758
Особенности режима карстовых вод в Скельской пещере (Ай-Петринский массив, Горный Крым) и их гидрогеологическая интерпретация <i>С. В. Токарев, Г. Н. Амеличев</i>	775
Метод определения расхода воды малых рек, основанный на обработке видеоизображений водной поверхности <i>Д. А. Антоненков</i>	790
Моделирование формирования стока рек горного Крыма в современных и прогнозируемых климатических условиях <i>А. С. Калугин, Ю. Г. Мотовилов, Н. О. Попова, Т. Д. Миллионщикова</i>	796
Оценка влияния климатических изменений XXI в. на баланс подземных вод юго-западного Крыма <i>В. Н. Самарцев, И. А. Чиганов, С. О. Гринецкий, С. П. Поздняков, Я. В. Сорокоумова, В. А. Бакиевская</i>	806
Водный баланс Крыма за 2001–2021 гг. по наземным и дистанционным данным <i>В. Ю. Григорьев, А. Г. Косицкий, Н. Л. Фролова</i>	822
К вопросу о прогнозировании катастрофических паводков на территории Крыма <i>А. С. Лубков, Е. В. Вышваркова, Е. Н. Воскресенская, А. Е. Щодро</i>	831
Оценка испарения по данным измерений на экспериментальных полигонах Крымского полуострова <i>И. В. Землянов, А. А. Сапожникова, Е. А. Ракчеева, А. Е. Павловский</i>	841
О формировании химического состава вод рек северо-западного склона Крымских гор <i>Е. П. Каюкова</i>	851
Оценка пространственно-временного распределения ДДТ, его метаболитов и цезия-137 в донных отложениях реки Салгир (Крым) <i>Л. В. Малахова, Н. Ю. Мирзоева, И. Н. Мосейченко, В. В. Войцеховская, Т. В. Малахова, С. В. Овечко</i>	871
Трансформация водопотребления и водоотведения в Республике Крым и г. Севастополе в условиях дефицита водных ресурсов <i>А. П. Демин, А. В. Зайцева, И. А. Вишневская</i>	884
Комплексная оценка экологического состояния реки Салгир на территории города Симферополя <i>В. С. Тарасенко, Н. Е. Волкова, В. С. Паштецкий, А. А. Манжо</i>	897

УДК 556.06

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕСКОЛЬКИМИ МОДЕЛЯМИ АТМОСФЕРНОГО РЕАНАЛИЗА НА ТЕРРИТОРИИ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА¹

© 2024 г. В. М. Морейдо^{a, d, *}, П. Н. Терский^{a, b}, Д. В. Абрамов^c^a Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия^b Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Москва, 119034 Россия^c Сколковский институт науки и технологий, Москва, 121205 Россия^d Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

*e-mail: vsevolod.moreydo@iwp.ru

Поступила в редакцию 23.04.2024 г.

После доработки 21.05.2024 г.

Принята к публикации 21.05.2024 г.

Многообразие природных условий п-ва Крым определяет различные режимы основных метеорологических характеристик, влияющих на водообеспеченность территории. Для оценки пространственно-временной неоднородности этих характеристик, а также для преодоления проблемы пропусков в данных наземных наблюдений могут использоваться результаты расчетов по моделям общей циркуляции атмосферы Земли с ассимиляцией данных наземных наблюдений, также известные как атмосферный реанализ. Приведен результат оценки качества воспроизведения приземной температуры воздуха и суммы осадков моделями атмосферного реанализа EWMBI, ERA5-Land и MSWEP в сравнении с данными наземных метеонаблюдений. Приведены основные характеристики использованных наборов данных (как наблюдений, так и расчетов), основные методы верификации, результаты оценки и выводы о применимости использованных данных в задачах моделирования. Оценены средние ошибки моделей по температуре воздуха и количеству осадков за различные периоды осреднения (сутки, месяц, год). Так, средние коэффициенты корреляции за разные периоды осреднения по температуре находятся в пределах $0.74 \div 0.97$, по осадкам — $0.52 \div 0.79$. Получено представление, что все модели достаточно корректно воспроизводят значения температуры и суммы осадков за разные периоды осреднения, однако у всех выявлена тенденция к занижению суточных сумм осадков при одновременном завышении количества дней с осадками.

Ключевые слова: атмосферный реанализ, температура воздуха, атмосферные осадки, экстремальные осадки, гидрометеорологические данные.

DOI: 10.31857/S0321059624060011 EDN: VPWJYQ

ВВЕДЕНИЕ

Пространственное распределение метеорологических величин — как непрерывных (температура и влажность воздуха), так и дискретных (атмосферные осадки, в особенности — высокой интенсивности) — определяющий фактор для формирования речного стока на территории суши. Данные о пространственном распределении температуры и осадков используются в гидрологических моделях для расчета стока воды с водосбора за период инструментальных наблюдений, а также для разработки методов гидрологического прогноза различной заблаговременно-

сти [1, 4]. Пространственная изменчивость этих величин, в особенности осадков, — основной лимитирующий фактор точности исходных данных для моделей формирования речного стока. Инструментальные измерения позволяют определять характеристики полей метеовеличин только в точке наблюдения, что вынуждает прибегать к сложным методам интерполяции для восстановления структуры поля на обширной территории рассматриваемого водосбора. В горных районах, где орография существенно влияет на пространственное распределение температуры и осадков, а ограниченная доступность местности не позволяет разместить достаточное количество измерительных станций, могут возникать существенные отклонения между интерполированными и реальными значениями метеовеличин, в особен-

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (темы 0126-2021-0001 (121040700170-9) и FMWZ-2022-0003).

ности при прохождении осадков высокой интенсивности в короткие промежутки времени.

Эволюция методов расчета полей метеорологических величин в последние десятилетия была направлена в сторону разработки методов атмосферного реанализа — глобальных физически обоснованных атмосферных моделей, учитывающих данные наблюдений при помощи их ассимиляции в расчетные зависимости для воспроизведения основных процессов тепло- и массообмена в атмосфере в узлах глобальной регулярной расчетной сетки [5, 6, 18, 24, 31]. Использование таких моделей позволяет получить значения целого ряда метеорологических переменных с высоким разрешением по пространству и во времени. Такие данные, в особенности распределение атмосферных осадков и приземной температуры воздуха, критически важны для оценки водных ресурсов любой территории.

С ранних лет развития моделей атмосферного реанализа, таких как NCEP1 [21], NCEP2 [23], MERRA [26], MERRA-2 [14], JRA-55 [12], и до серии наиболее современных, разрабатываемых в Европейском центре среднесрочных метеорологических прогнозов методов реанализа ERA-15, ERA-40 [30], ERA-Interim [10], ERA5 [19] и ERA5-Land [25] в последние годы они были предметом оценки качества воспроизведения данных измерений как в глобальном, так и в региональном масштабе [3, 16], а также оценки возможности использования этих данных как источник данных для гидрологического моделирования [27–29].

Географическое положение и орографическое строение п-ова Крым — причина пестрой картины распределения природных зон на этой сравнительно небольшой по площади территории [11]. Распределение атмосферных осадков в пространстве здесь очень контрастно — от 250 мм/год на севере полуострова до 1000 мм в южной горной части. При этом наблюдательная сеть за атмосферными осадками достаточно редкая, особенно в горах на юге полуострова, там — верховья всех речных систем и формируется основная масса его водных ресурсов. Для целей исследования распределения осадков и моделирования формирования речного стока

полуострова целесообразно использовать данные атмосферного реанализа. Настоящее исследование направлено на локальную верификацию двух продуктов атмосферного реанализа и одного синтетического набора данных об атмосферных осадках на территории Крыма по данным наземных наблюдений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходные материалы

В качестве тестируемых на соответствие данным наблюдений были выбраны наборы сеточных атмосферных данных ERA5-Land, EWEMBI и MSWEP.

Набор данных EWEMBI (Earth2Observe, WFDEI, ERA-Interim data Merged, Bias-corrected for ISIMIP [13]), синтезированный в Потсдамском институте климата (Германия) из нескольких глобальных наборов данных, таких как реанализ ERA-Interim [10], WFDEI [32], E2OBS [8], NASA/GEWEX SRB [9], — наиболее ранний по времени создания из анализируемых продуктов. Реанализ EWEMBI был изначально предназначен для корректировки результатов расчетов по ансамблю глобальных климатических моделей в эксперименте ISI-MIP (The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project) за исторический период с 1979 по 2016 г. и приведения этих расчетов в соответствие с данными инструментальных наблюдений, тем самым — ликвидации систематической ошибки (так называемая “bias-correction”) и уточнения данных климатических расчетов до конца XXI в. [15, 22]. Данные в наборе представлены в виде хронологических рядов в узлах глобальной сетки с пространственным разрешением $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Территория Крыма покрыта 50 ячейками расчетной сетки (рис. 1). Для сопоставления с инструментальными наблюдениями взяты ряды среднесуточных величин приземной температуры воздуха t_{as} ($^\circ\text{C}$) и суточной суммы осадков pr (мм).

Продукт оперативного атмосферного реанализа ERA5-Land представляет собой результат расчета по модели земной системы с начальными условиями из модели общей циркуляции атмосферы [25]. Расчет проводится ансамблевым

методом на часовом интервале по глобальной расчетной сетке пространственным разрешением $0.1^\circ \times 0.1^\circ$. Архив расчетов начинается с 1950 г. и доступен в квазиоперативном режиме с запаздыванием 5 сут от даты обращения к архиву. Для настоящего исследования взяты данные по температуре воздуха и количеству осадков с 1970 по 2022 г., которые были агрегированы до суточных значений.

Набор глобальных данных об осадках MSWEP (Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation [7]) представляет собой результат оптимального взвешивания данных наблюдений на глобальной сети метеостанций, измерений со спутников и расчетов по модели общей циркуляции, т. е. постобработки данных нескольких источников информации с помощью методов машинного

обучения. В наборе содержатся только данные об осадках на расчетной сетке $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, при этом временная дискретность данных – 3 ч, начало данных – с 1979 г. практически в реальном времени (запаздывание последнего срока в данных – 3 ч от среднего времени по Гринвичу). Для анализа срочные данные были агрегированы до суточных значений.

Для верификации данных атмосферных реанализов использованы различные источники данных, находящиеся в свободном доступе в сети Интернет. В базе данных ВНИИГМИ-МЦД [2] содержатся сведения о наблюдениях только на трех метеостанциях на исследуемой территории (рис. 1): Симферополь (код WMO 33946), Феодосия (33976) и Керчь (33983). Очевидно, что для надежной оценки продуктов реанализа

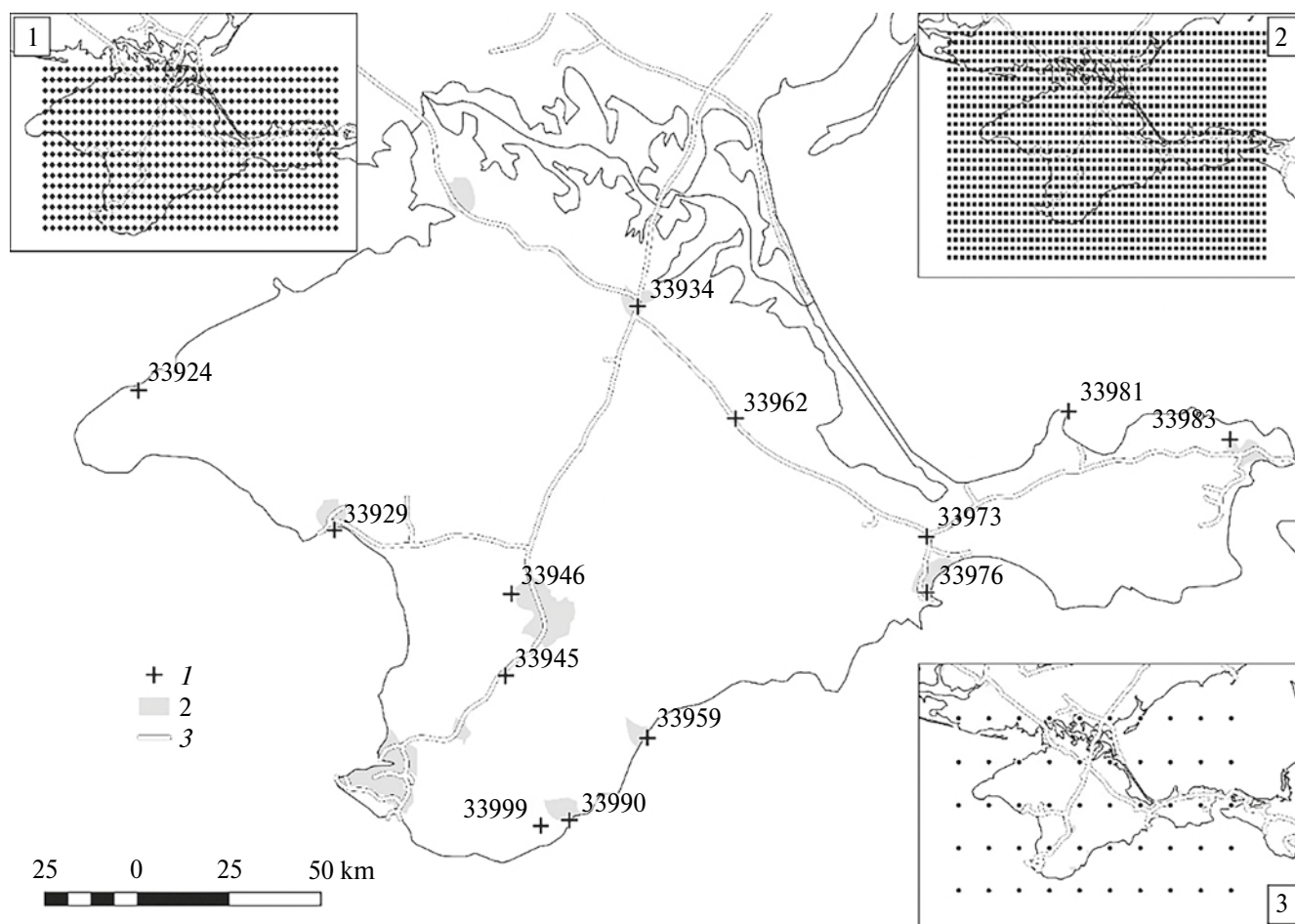


Рис. 1. Картограмма территории расположения метеостанций, использованных в исследовании. Цифрами на схеме обозначены: 1 – метеостанции, 2 – города, 3 – железнодорожные магистрали. Индексы – по табл. 1. Во врезках представлены фрагменты расчетных сеток MSWEP (1), ERA5-Land (2) и EWEMBI (3).

этого недостаточно. В связи с этим в качестве основного массива данных наземных наблюдений использован массив суточного осреднения по данным более 9000 метеостанций глобального охвата Global Surface Summary of the Day (GSOD), полученный из глобальной базы Национального центра информации по окружающей среде Национальной администрации по атмосфере и океану США NOAA NCEI [17], здесь и далее именуемый “Данные GSOD”. Для исследуемой территории получены временные ряды среднесуточных значений температуры воздуха и суточных сумм осадков с 13 метеостанций на территории Крымского п-ова (рис. 1).

Период наблюдений на них колеблется от 10 до 120 лет (табл. 1). Несмотря на это, по каждой станции использованы все данные, период которых пересекается с периодом реанализа 1950–2021 гг.

Методы

Для анализа исходных массивов данных, полученных из соответствующих источников в сети Интернет, разработан программный код на языке R. Для сопоставления данных на метеостанциях и в узлах расчетных сеток использован пакет (библиотека программных функций) raster [20]. Данные из узлов сетки пересчитывались в бли-

жайшую точку расположения метеостанции с помощью метода билинейной интерполяции.

Первоначально данные, полученные из архива GSOD, были проверены на соответствие данным из архива ВНИИГМИ-МЦД [2] путем сопоставления значений на метеостанциях 33946 Симферополь, 33976 Феодосия и 33983 Керчь. Результаты показали, что коэффициенты линейной корреляции для температуры и осадков между наборами данных GSOD и ВНИИГМИ-МЦД составляют >0.99 , среднеквадратическая ошибка по температуре – 0.16°C , по осадкам – 0.07 мм. Наличие ошибки в данных объясняется двойной конвертацией единиц: особенность набора данных GSOD – хранение в американской системе мер. Несмотря на наличие этих незначительных ошибок, было принято решение использовать данные GSOD для оценки продуктов реанализа и сеточных осадков на всех метеостанциях.

Для оценки качества воспроизведения данных наблюдений за температурой воздуха и осадками на трех интервалах осреднения (сутки, месяц, год) рассчитаны следующие метрики: средняя абсолютная ошибка (“mean absolute error”, MAE), средняя квадратическая ошибка (“root mean square error”, RMSE) и коэффициент линейной корреляции R . Для осадков отдельно оценивалось среднее количество дней с осадка-

Таблица 1. Перечень метеостанций и периодов, за которые получены данные о среднесуточной температуре воздуха и суточной сумме осадков. Характеристики использованных рядов наземных наблюдений

№	Индекс ВМО	Название	Высота, м абс.	Начало	Конец	$\bar{T}$, $^{\circ}\text{C}$	$\bar{P}$, мм
	33924	Черноморское	10	09.01.1955	26.08.2021	11.3	338
	33929	Евпатория	6	03.01.1959	11.06.2009	8.8	402
	33934	Джанкой	8	02.01.1955	11.06.2009	10.5	405
	33945	Почтовое	176	01.01.2000	11.06.2009	13.5	459
	33946	Симферополь	181	01.03.1898	26.08.2021	10.7	495
	33959	Алушта	7	01.01.1959	11.06.2009	11.9	466
	33962	Нижнегорск	20	01.01.1959	11.06.2009	8.0	399
	33973	Владиславовка	37	02.01.1959	11.06.2009	12.9	419
	33976	Феодосия	22	01.01.1982	30.03.2015	11.9	388
	33981	Мыс Казантип	101	03.09.1977	11.06.2009	9.8	368
	33983	Керчь	49	01.01.1936	26.08.2021	11.3	416
	33990	Ялта	72	29.08.1949	30.03.2015	12.8	573
	33999	Ай-Петри	1180	01.09.1899	31.12.2012	5.0	932

ми >0 мм за месяц, а также рассчитывались бинарные метрики условного распределения модели и наблюдений: вероятность определения наличия осадков (“probability of detection”, POD) и вероятность ложного определения наличия осадков (“false alarm rate”, FAR):

$$\text{POD} = \frac{a}{a+c}, \quad (1)$$

$$\text{FAR} = \frac{b}{a+b}, \quad (2)$$

где a — количество корректно определенных реанализом дней с осадками, b — количество ложно определенных дней с осадками, c — количество реально наблюдавшихся дней с осадками, не об-

наруженных в данных реанализа. Воспроизведение моделями экстремальных осадков оценено отдельно путем расчета индексов POD и FAR для событий с фактическими суточными суммами осадков >10 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Все описанные метрики рассчитаны для всех метеостанций по отдельности, затем осреднены и далее демонстрируются в виде средних значений для массива станций либо распределения величины метрики. Распределение суточных значений температуры воздуха по наборам данных реанализов EWEMBI и ERA5-Land на всех метеостанциях близко к наблюдавшему-

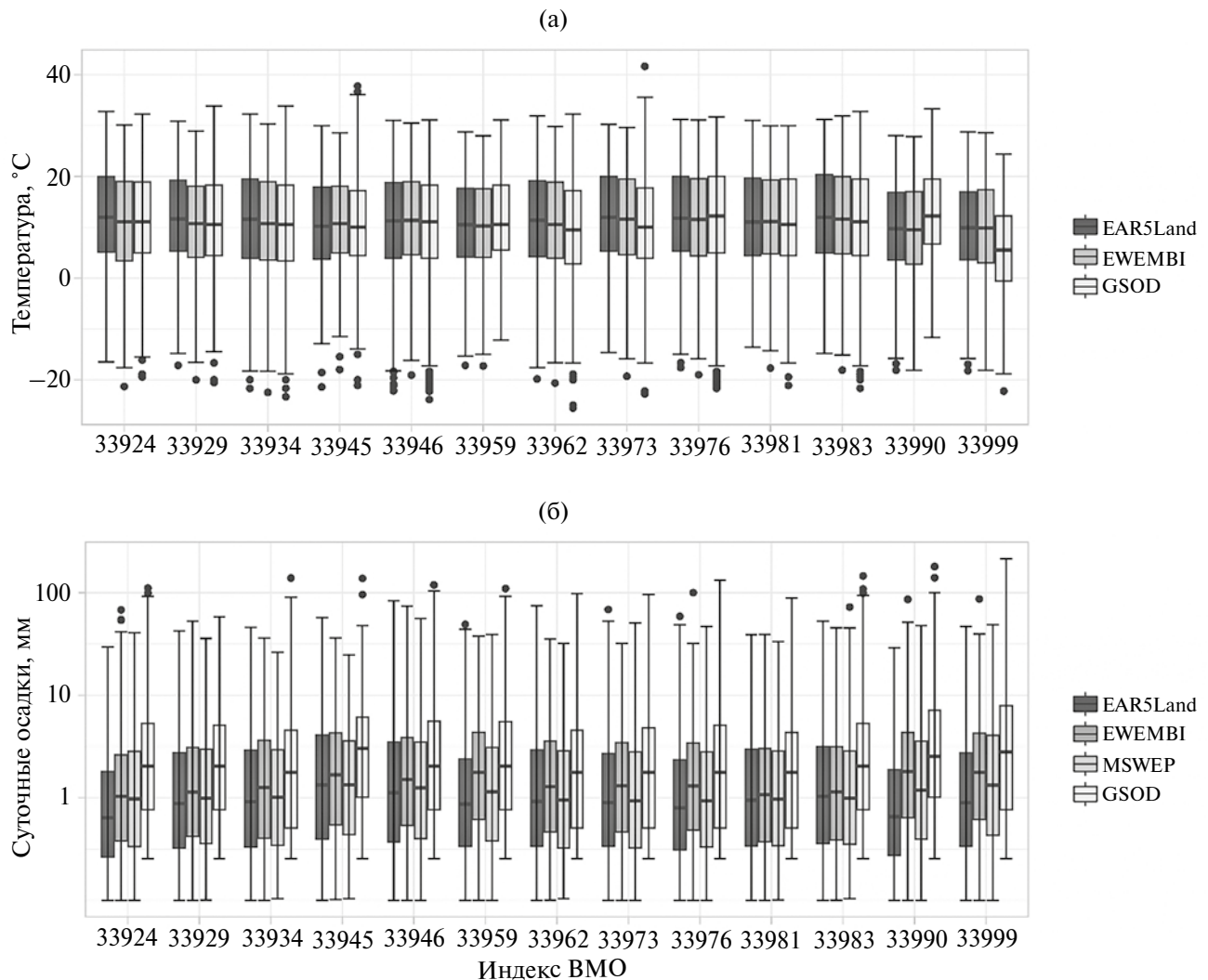


Рис. 2. Сравнение распределений суточных значений температуры (а) и сумм осадков (б) по метеостанциям. Закрашенные области показывают 50% распределения, линии — по 25%, горизонтальная черта — медиана, точки — выбросы. Вертикальная ось (б) — логарифмическая.

ся (рис. 2а). При этом распределение суточных сумм осадков зачастую существенно занижено (рис. 2б), как и максимальные суточные осадки.

Средняя по всем станциям корреляция суточных значений температуры воздуха по данным наблюдений с данными реанализа EWEMBI составляет 0.975, реанализа ERA5-Land – 0.979 (табл. 2).

Суточные значения температуры воздуха и суммы осадков воспроизведены с большей точностью реанализом ERA5-Land, при этом линейная связь уменьшается с увеличением периода осреднения при практически неизменной ошибке. Это имеет обратный эффект для корреляции осадков – значения возрастают при увеличении периода осреднения. Годовые средние значения корреляции температуры и осадков лучше у модели EWEMBI, хотя ошибка осадков меньше у MSWEP при меньшей линейной связности.

Ошибки воспроизведения годовой суммы осадков меньше у MSWEP, хотя корреляция выше также у EWEMB, при несколько большей ошибке. Распределение ошибок среднемесячных значений температуры показывает, что воспроизведение по всем метеостанциям достаточно равномерное и ошибка составляет в среднем ~1°C как по реанализу ERA5Land, так и по реанализу EWEMBI (рис. 3а). При этом наблюдается небольшое увеличение ошибок в декабре–январе и августе–сентябре.

Ошибки определения среднемесячных сумм осадков минимальны для реанализа MSWEP (рис. 3б), однако в отдельные месяцы весной и осенью реанализ EWEMBI также показывает низкие значения. В летние месяцы наибольшая ошибка у ERA5Land могут достигать 30–40 мм.

Количество дней с осадками не воспроизводится адекватно ни одной моделью (рис. 4). В среднем каждая модель в два раза, а ERA5Land – до 3 раз превышает количество дней с осадками, особенно в летние месяцы. Связанные с этим показатели POD определения наличия суточных осадков >0.01 мм наивысшие у ERA5Land (рис. 5а), но для нее также характерны и наивысшие значения доли ложного определения наличия осадков FAR – до 0.7 в летние месяцы, т. е. >70% событий выпадения осадков было неверно определено моделью. Такая тенденция сохраняется и для событий выпадения сумм осадков >10 мм в сутки: ERA5Land показывает самые высокие значения как POD, так и FAR (рис. 5б). MSWEP при этом почти так же правильно определяет наличие осадков, но делает меньше ошибочных определений.

ОБСУЖДЕНИЕ

Воспроизведение температуры воздуха в моделях реанализа происходит с приемлемой точностью, так как систематическая ошибка отсутствует, а случайные ошибки в среднем

Таблица 2. Оценка качества воспроизведения температуры воздуха и суммы осадков по суточным, месячным и годовым интервалам (полужирным шрифтом – лучшие значения показателя из всех продуктов)

Набор данных	Температура воздуха			Сумма осадков		
	<i>R</i>	MAE, °C	RMSE, °C	<i>R</i>	MAE, мм	RMSE, мм
Сутки						
EWEMBI	0.975	1.82	2.34	0.480	1.85	4.58
ERA5-Land	0.979	1.73	2.21	0.525	1.69	4.40
MSWEP	-	-	-	0.497	1.72	4.56
Месяц						
EWEMBI	0.785	1.53	1.87	0.364	28.0	38.2
ERA5-Land	0.791	1.55	1.89	0.611	24.4	31.8
MSWEP	-	-	-	0.287	27.3	36.9
Год						
EWEMBI	0.741	1.66	2.24	0.796	156	184
ERA5-Land	0.708	1.96	2.77	0.752	192	214
MSWEP	-	-	-	0.630	128	154

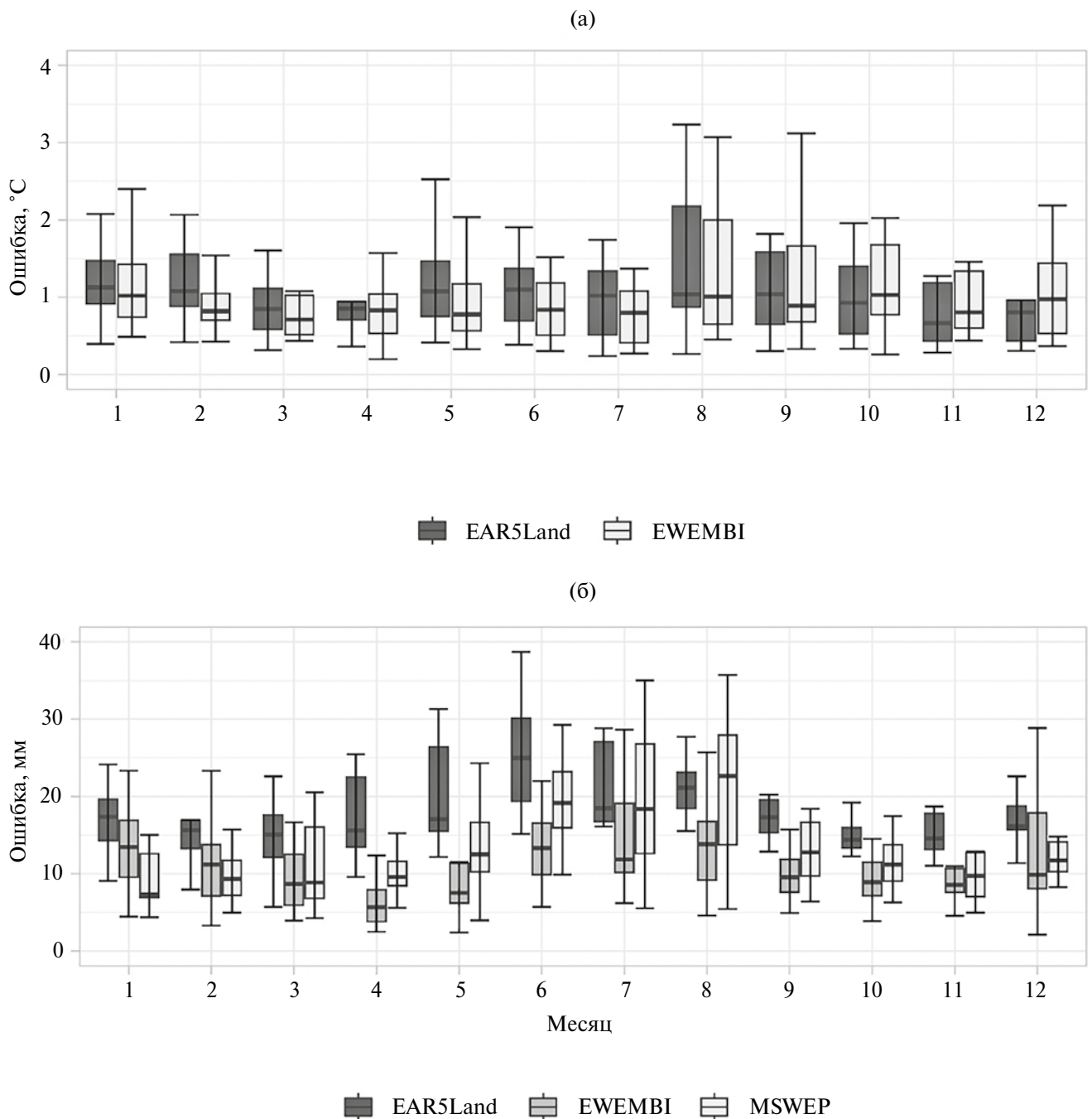


Рис. 3. Распределение среднеквадратических ошибок реанализа среднемесячных значений температуры (а) и сумм осадков (б).

<1.2 градусов. Что касается воспроизведения осадков, то все модели реанализа показывают систематическое занижение суточных сумм на фоне двух- и трехкратного превышения количества дней с осадками в месяц над реальным. Очевидно, это происходит для достижения лучшего соответствия модельных осадков данным наблю-

дений на более длительных интервалах осреднения — месяц, год; это подтверждается увеличением коэффициента корреляции осадков при увеличении периода осреднения. Дополнительное подтверждение завышения моделями количества событий выпадения осадков — оценка по метрикам условного распределения выпадения

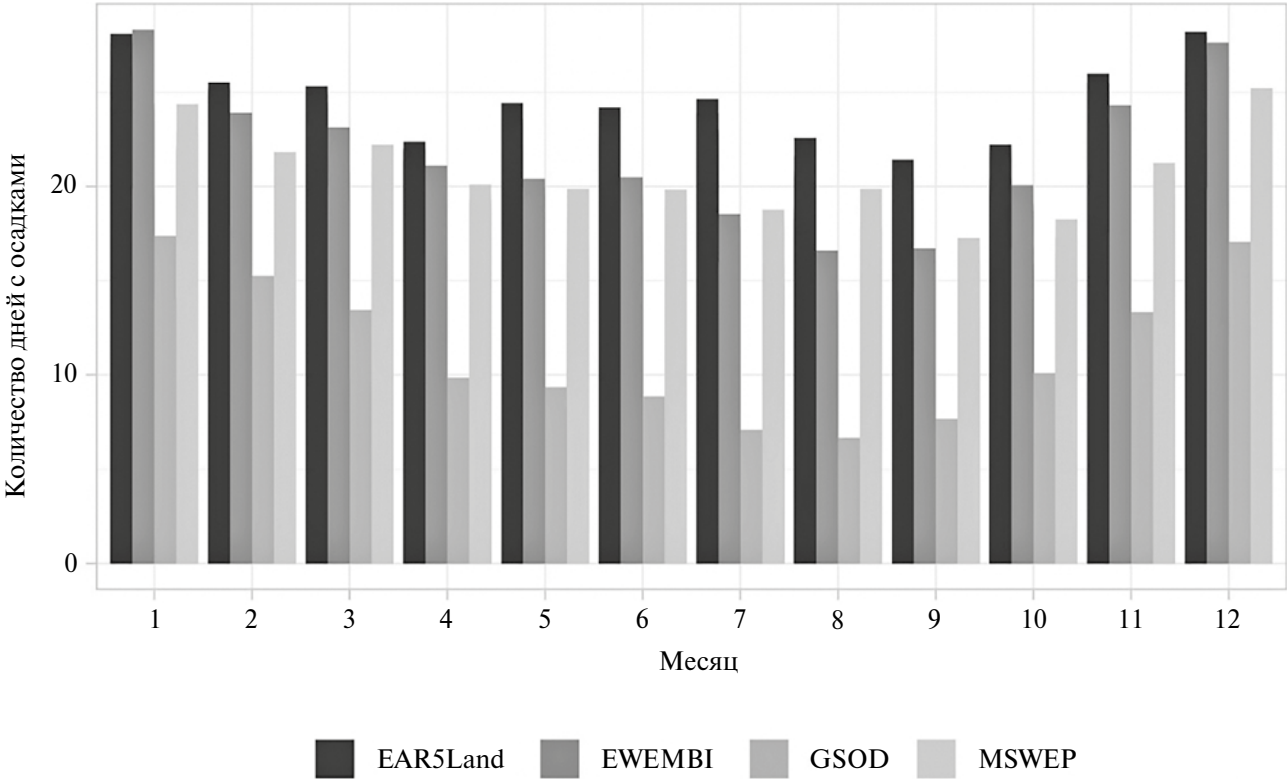


Рис. 4. Внутригодовое распределение количества дней с осадками >0 мм.

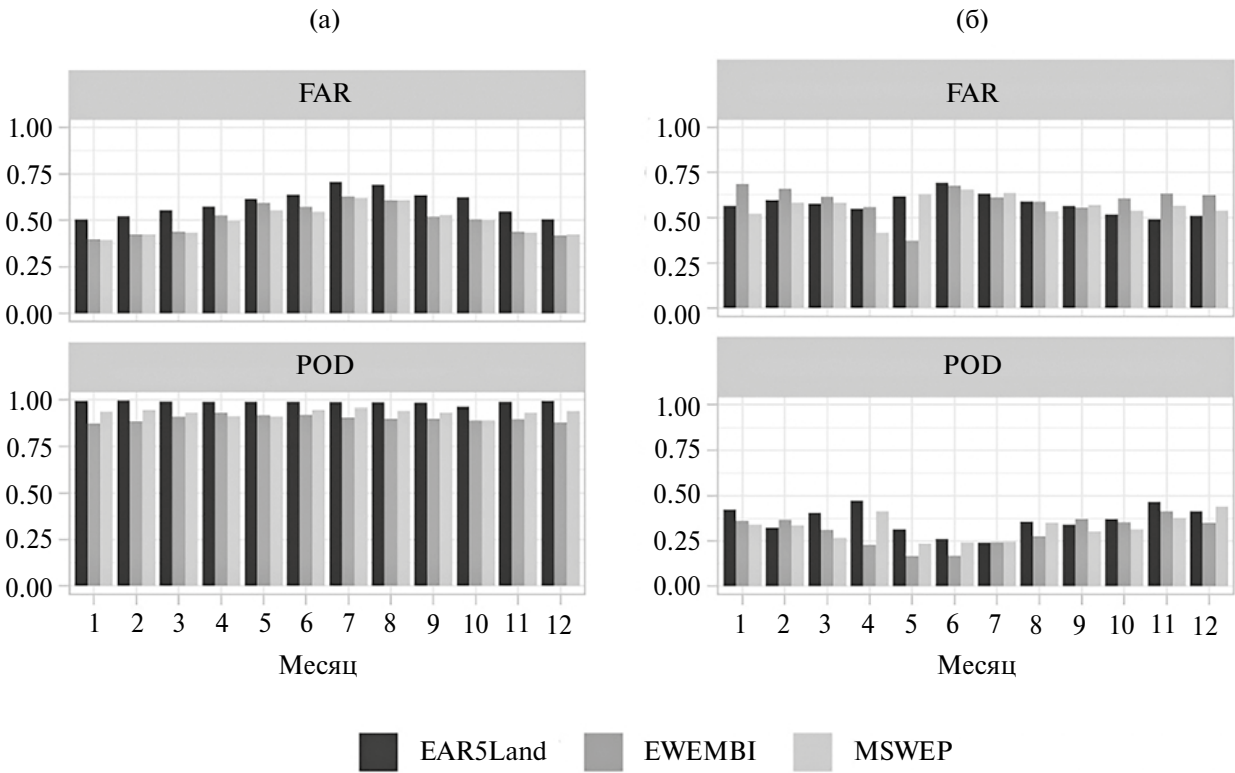


Рис. 5. Показатели условного распределения наличия осадков по модели и данным наблюдений: а — для осадков >0.01 мм, б — для осадков >10 мм.

осадков. По критерию вероятности определения дня с осадками POD наилучшие показатели у модели ERA5-Land, при этом показатель ложного определения FAR — также у этой модели, и его величина доходит до 0.75, что характеризует три четверти событий осадков как ложно определенные. Эти результаты соответствуют некоторым известным из литературы оценкам реанализа ERA5-Land для регионов Средиземноморья [16]. Показатели у MSWEP несколько лучше, так как доли и корректно определенных событий по критерию POD, и некорректно выявленных осадков по критерию FAR ниже, чем у других продуктов.

В конечном итоге средняя ошибка по всем метеостанциям в месячном и годовом интервалах относительно невысока, хотя на станциях в северных степных районах Крыма наблюдается тенденция к завышению, а в горных — к занижению суммарного количества осадков.

Воспроизведение высоких (>10 мм) сумм суточных осадков сравнительно неудачно у всех моделей и повторяет описанную выше тенденцию — доля корректно определенных осадков у ERA5-Land несколько выше остальных на фоне очень большой доли ложно определенных высоких осадков. В этом отношении MSWEP снова выглядит более предпочтительно по причине наименьших из трех моделей значений FAR.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель данной работы состояла в оценке применимости различных продуктов метеорологических реанализов для региональных исследований текущих и будущих изменений климата и водных ресурсов. Для этого было необходимо: 1) оценить набор данных EWEMBI, используемый для коррекции климатических проекций до конца XXI в., по которым строятся проекции влияния изменений климата на местные водные ресурсы; 2) оценить два продукта квазиоперативного реанализа атмосферы, которые могут быть использованы для воспроизведения экстремальных гидрологических событий в недавнем прошлом и оценить их гидрологические параметры; 3) оценить эти квазиоперативные продукты на способность воспроизводить температуру и осадки за холодный период года, что

может быть использовано для оценки имеющихся водных ресурсов для водоснабжения региона в теплый период года.

В результате были оценены ошибки моделей реанализа и особенности их воспроизведения естественных условий температуры воздуха и количества осадков. По воспроизведению температуры воздуха в суточном интервале осреднения более предпочтительным оказался реанализ ERA5Land, хотя на годовом интервале несколько лучше оценки у EWEMBI. В отношении суточных сумм осадков по характеристикам линейной связи также выделяется ERA5Land, хотя выявлено существенное превышение этой моделью количества дней с осадками в месяц. Средние ошибки меньше у модели MSWEP, а также она более корректно воспроизводит количество дней с осадками.

В отношении среднемесячных значений температуры и сумм осадков в южной гористой части полуострова все модели показали большие ошибки в зимний период, однако модель MSWEP по сумме осадков оказалась несколько ближе к данным наблюдений.

Корректировка моделей изменения климата по реанализу EWEMBI, в целом, выглядит оправданной по причине воспроизведения этой моделью средних характеристик по укрупненным интервалам времени и пространству. Интенсивные осадки лучше воспроизводятся моделью MSWEP, поскольку она характеризуется меньшей долей ложных событий осадков, чем модель ERA5Land. Оценку запасов воды в снежном покрове целесообразно проводить по данным реанализа ERA5Land, так как на месячном интервале осреднения она имеет наилучшие показатели воспроизведения температуры и осадков. Последняя, впрочем, имеет преимущество в виде учащенных по времени расчетных шагов (1 ч) по сравнению с MSWEP, поэтому может быть полезна в задачах моделирования волн быстроразвивающихся паводков, хотя, возможно, и в ущерб точности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белякова П.А., Борщ С.В., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Прогноз максимального стока рек Чер-

- номорского побережья Кавказа // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 6. С. 4–16.
2. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Температура воздуха и количество осадков (ежедневные данные) <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation>
 3. Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Куреева М.Б., Степаненко В.М. Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения слоя осадков реанализом ERA5 на территории России // Изв. РАН. Сер. географическая. 2022. № 3 (86). С. 435–446.
 4. Мотовилов Ю.Г. Моделирование полей речного стока (на примере бассейна р. Лена) // Метеорология и гидрология. 2017. Т. 2. С. 78–88.
 5. Ayzel G., Varentsova N., Erina O., Sokolov D., Kurochkin L., Moreydo V. OpenForecast: The First Open-Source Operational Runoff Forecasting System in Russia // WATER. 2019. № 8 (11).
 6. Bastola S., Misra V. Evaluation of dynamically downscaled reanalysis precipitation data for hydrological application // Hydrol. Processes. 2014. № 4 (28). С. 1989–2002.
 7. Beck H.E., Wood E.F., Pan M., Fisher C.K., Miralles D.G., Van Dijk A.I.J.M., McVicar T.R., Adler R.F. MSWep v2 Global 3-hourly 0.1° precipitation: Methodology and quantitative assessment // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2019. № 3 (100). С. 473–500.
 8. Calton B., Chellekens J., Martinez-de la Torre A. Water Resource Reanalysis v1: Data Access and Model Verification Results <https://zenodo.org/records/57760> (дата обращения: 14.03.2024)
 9. Cox S.J., Stackhouse P.W., Gupta S.K., Mikovitz J.C., Zhang T. NASA/GEWEX shortwave surface radiation budget: Integrated data product with reprocessed radiance, cloud, and meteorology inputs, and new surface albedo treatment 2017.
 10. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., Berg L. van de, Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.J., Park B.K., Peubey C., Rosnay P. de, Tavo-lato C., Thépaut J.N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly J. Royal Meteorol. Soc. 2011. № 656 (137). P. 553–597.
 11. Dublyansky Y.V., Klimchouk A.B., Tokarev S.V., Amelichev G.N., Langhamer L., Spötl C. Stable isotopic composition of atmospheric precipitation on the Crimean Peninsula and its controlling factors // J. Hydrol. 2018. № July (565). P. 61–73.
 12. Ebita A., Kobayashi S., Ota Y., Moriya M., Kumabe R., Onogi K., Harada Y., Yasui S., Miyaoka K., Takahashi K., Kamahori H., Kobayashi C., Endo H., Soma M., Oikawa Y., Ishimizu T. The Japanese 55-year Reanalysis “JRA-55”: An Interim Rep // SOLA. 2011. № 1 (7). P. 149–152.
 13. Frieler K., Frieler, Katja, Stefan Lange, Franziska Piontek et al. Assessing the impacts of 1.5°C global warming - Simulation protocol of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP2b) // Geosci. Model Development. 2017. № 12 (10). P. 4321–4345.
 14. Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., Silva A.M. da, Gu W., Kim G.K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J.E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S.D., Sienkiewicz M., Zhao B. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // J. Climate. 2017. № 14 (30). P. 5419–5454.
 15. Gelfan A.N., Millionschikova T.D. Validation of a Hydrological Model Intended for Impact Study: Problem Statement and Solution Example for Selenga River Basin // Water Resour. 2018. № Suppl. 1 (45). P. S90–S101.
 16. Gomis-Cebolla J., Rattayova V., Salazar-Galán S., Francés F. Evaluation of ERA5 and ERA5-Land reanalysis precipitation datasets over Spain (1951–2020) // Atmospheric Res. 2023. (284). P. 106606.
 17. GSOD NOAA National Centers of Environmental Information. 1999. Global Surface Summary of the Day – GSOD. 1.0. <https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C00516> (дата обращения: 04.03.2024)
 18. Hassler B., Lauer A. Comparison of Reanalysis and Observational Precipitation Datasets Including ERA5 and WFDE5 // Atmosphere 2021. V. 12. Page 1462. 2021. № 11 (12). С. 1462.
 19. Hersbach H., Hersbach, Hans, Bill Bell, Paul Berrisford et al. The ERA5 global reanalysis // Quarterly J. Royal Meteorol. Soc. 2020. № 730 (146). P. 1999–2049.
 20. Hijmans R.J. Raster: Geographic Data Analysis and Modeling // 2024.
 21. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deav-

- en D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K. C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1996. № 3 (77). P. 437–471.
22. *Kalugin A.* Climate Change Attribution in the Lena and Selenga River Runoff: An Evaluation Based on the Earth System and Regional Hydrological Models // *Water (Switzerland)*. 2022. № 1 (14). P. 118.
 23. *Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S.K., Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G.L.* NCEP–DOE AMIP–II Reanalysis (R-2) // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2002. № 11 (83). P. 1631–1644.
 24. *Lange S.* EartH2Observe, WFDEI and ERA-Interim data Merged and Bias-corrected for ISIMIP (EWEM-BI) <https://dataservices.gfz-potsdam.de/pik/show-short.php?id=escidoc:3928916> (дата обращения: 24.11.2021)
 25. *Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D.G., Piles M., Rodríguez-Fernández N.J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J.-N.* ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications *Earth System Science Data Discussions* // *Earth System Sci. Data*. 2021. № January 2020 (82). P. 1–50.
 26. *Rienecker M.M., Suarez M.J., Gelaro R., Todling R., Bacmeister J., Liu E., Bosilovich M. G., Schubert S.D., Takacs L., Kim G.K., Bloom S., Chen J., Collins D., Conaty A., Da Silva A., Gu W., Joiner J., Koster R.D., Lucchesi R., Molod A., Owens T., Pawson S., Pegion P., Redder C.R., Reichle R., Robertson F.R., Ruddick A.G., Sienkiewicz M., Woollen J.* MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications // *J. Climate*. 2011. № 14 (24). P. 3624–3648.
 27. *Sharifi E., Eitzinger J., Dorigo W.* Performance of the State-Of-The-Art Gridded Precipitation Products over Mountainous Terrain: A Regional Study over Austria // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. 2019. 17 (11). P. 2018. <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/17/2018>
 28. *Sorman A.A., Yang H., Hafizi H., Sorman A.A.* Assessment of 13 Gridded Precipitation Datasets for Hydrological Modeling in a Mountainous Basin // *Atmosphere* 2022. V. 13. P. 143. 2022. № 1 (13). P. 143. <https://doi.org/10.3390/atmos13010143>
 29. *Tarek M., Brissette F.P., Arsenault R.* Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modelling over North America // *Hydrol. Earth System Sci.* 2020. № 5 (24). P. 2527–2544.
 30. *Uppala S.M., Kållberg P.W., Adrian J. Simmons et al.* The ERA-40 re-analysis // *Quarterly J. Royal Meteorol. Soc.* 2005. № 612 (131). P. 2961–3012.
 31. *Ward E., Buytaert W., Peaver L., Wheeler H.* Evaluation of precipitation products over complex mountainous terrain: A water resources perspective // *ADVANCES IN WATER RESOURCES*. 2011. № 10 (34). P. 1222–1231.
 32. *Weedon G.P., Balsamo G., Bellouin N., Gomes S., Best M.J., Viterbo P.* The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data // *Water Resour. Res.* 2014. № 9 (50). P. 7505–7514.

ASSESSING THE REPRODUCTION QUALITY OF METEOROLOGICAL CHARACTERISTICS BY SEVERAL ATMOSPHERIC REANALYSIS MODELS ON THE TERRITORY OF CRIMEAN PENINSULA

V. M. Moreido^{a, d, *}, P. N. Terskii^{a, b}, D. V. Abramov^c

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

^b*State Oceanographic Institute, Moscow, 119034 Russia*

^c*Skolkovo Institute for Science and Technology, Moscow, 121205 Russia*

^d*Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: vsevolod.moreydo@iwp.ru*

The diversity of natural conditions of the Crimean Peninsula determines different regimes of the main meteorological characteristics that determine the water availability for the territory. The estimation of the spatiotemporal heterogeneity of these characteristics and the solution of the problem of gaps in the ground-based observation data can be based on the results of calculations by general circulation models of the Earth's atmosphere with assimilation of ground-based observation data, also known as atmospheric reanalysis. Estimates of the quality of reproduction of the surface air temperature and the total precipitation by atmospheric reanalysis models EWEMBI, ERA5-Land, and MSWEP are given and compared with data from ground-based meteorological observations. The main characteristics of the data sets used (both observational and calculated), the main verification methods, the results of estimates and the conclusions regarding the applicability of the data used in simulation problems are given. The mean errors of the models in air temperature and the amount of precipitation over various averaging periods (day, month, year) are given. Thus, the mean coefficients of correlation over different averaging periods vary within 0.74–0.97 for temperature and 0.52–0.79 for precipitation. The results show that all model reproduce the values of the temperature and total precipitation over different averaging periods with an acceptable accuracy; however, all of them show a tendency toward underestimation of the daily sums of precipitation along with an overestimation of the number of days with precipitation.

Keywords: atmospheric reanalysis, air temperature, atmospheric precipitation, extreme precipitation, hydrometeorological data

УДК 556.5:556.3:551.44

ОЦЕНКА СОСТАВЛЯЮЩИХ РЕЧНОГО СТОКА ГОРНОГО КРЫМА. 1. СТОК МАЛЫХ РЕК¹

© 2024 г. Т. С. Губарева^{a, *}, Г. Н. Амеличев^{a, b}, Б. И. Гарцман^{a, c}, С. В. Токарев^{a, b},
Б. А. Вахрушев^{a, b}, В. Г. Науменко^b, Е. Г. Амеличев^{a, b}, И. Б. Вахрушев^{a, b}

^aИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

^bКрымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, 295007 Россия

^cИнститут природно-технических систем РАН, Севастополь, 299011 Россия

*e-mail: tgubareva@bk.ru

Поступила в редакцию 08.03.2024 г.

После доработки 20.05.2024 г.

Принята к публикации 20.05.2024 г.

Для экспериментальных речных бассейнов Горного Крыма выполнена оценка составляющих речного стока на основе двухтрассерной модели смешения с тремя источниками питания. В качестве источников питания речного стока закарстованных водосборов выделены: эпикарстовые воды, почвенно-склоновые воды и базисные воды, циркулирующие у контакта с подстилающими водоупорными породами. Существенную долю речного стока малых рек составляют эпикарстовые воды. Их доли в замыкающих створах увеличиваются в период паводков, закономерно возрастая с увеличением расхода воды, подчиняясь логарифмическим зависимостям. Доли базисных вод по отношению к долям эпикарстовых вод уменьшаются.

Ключевые слова: речные водосборы, карст, источники питания, химические трассеры, модель смешения ЕММА, Горный Крым.

DOI: 10.31857/S0321059624060024 **EDN:** VPSEMI

ВВЕДЕНИЕ

Изучение преимущественных путей движения водных масс в речных бассейнах и в карстовых водоносных системах (КВС) Горного Крыма, а также знание специфики формирования их стока необходимы для понимания происходящих в них гидрологических и биогеохимических процессов. Высокая канальная пустотность и трещиноватость растворимых пород, слагающих поверхности закарстованных бассейнов, обуславливают разветвленность и многообразие локальных путей стока в толще водосбора, при этом часть воды из них разгружается на поверхность в виде родников, другая часть продолжает свой путь, образуя подземные карстовые водоносные системы.

Обобщение различных сведений о характере родников и других водопроявлений в пределах

водосборных площадей, в том числе и их химического состава, может дать полезную информацию о водных массах, циркулирующих в бассейне, а также является основой для применения трассерных методов исследования. Водные массы, обладающие сходными физико-химическими свойствами, формируются в однородных условиях. Присутствие значимых отличий — основа выделения генетических типов вод и потенциальных источников питания, формирующих сток реки.

В замыкающем створе сток можно представить в виде смеси вод нескольких стабильных источников питания или, другими словами, составляющих (компонентов) стока. Под стабильными источниками понимаются те источники питания, которые вносят существенный вклад в формирование речной водной массы и действуют продолжительное время в годовом цикле. В виду формирования речного стока преимущественно, а в случае КВС — исключительно, подземной поверхностью главным инструментарием

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема FMWZ-2022-0001).

ем их исследования выступают трассерные методы.

Модели смешения с использованием химических индикаторов/трассеров в качестве методики разделения гидрографов успешно и широко применяются для установления источников питания, выявления преимущественных путей стока в масштабе водосбора, оценки их взаимовязанной динамики, что в конечном итоге приводит к построению концептуальных моделей стока бассейнов в различных ландшафтно-климатических условиях. Этот инструмент позволяет также по-новому взглянуть на гидрологические процессы в отношении переменных во времени источников воды и стабильных путей стока в гидрологии водосбора [20, 21, 26].

Метод разделения гидрографа на основе методики “end-member mixing analysis” (EMMA) [15, 16] предполагает консервативное смешивание водных масс и требует обоснования источников питания (“end-members”). Проблемы неопределенности модели из-за пространственной и временной изменчивости химического состава до сих пор не решены полностью [18, 23, 25]. С применением этой методики выполнены исследования в различных естественных ландшафтных обстановках, в том числе в залесенных водосборах [5, 6, 13, 19, 24], в горных районах [8, 10, 15, 18, 23], в бассейнах арктических рек [4, 14], в бассейнах рек с ледниковым питанием [28, 29], в бассейнах рек карстового питания Западной Абхазии [1, 2].

Цель исследования — с использованием методики EMMA выявить специфику составляющих речного стока, формирующегося в условиях высокой закарстованности бассейнов. Не все объекты исследования — типичные речные водосборы, поэтому они были разделены на две группы: первая — малые речные бассейны, вторая — бассейны КВС. В соответствии с этим делением результаты работы в рамках одной статьи представлены в двух частях. Общее для них — постановка задач и методический подход — с использованием данных гидролого-гидрохимического мониторинга, выполнявшегося в экспериментальных бассейнах в 2021–2023 гг., адаптировать трассерную EMMA-модель смешения, выявить

основные источники питания стока, выполнить и проанализировать разделение гидрографов на составляющие.

Два речных экспериментальных бассейна — Кучук-Узенбаш и Тонас — располагаются в верховьях крупных рек Крыма Бельбек и Биюк-Карасу, характеризуются существенными различиями в геологическом строении и ландшафтных условиях, что отражается в их водности. Три экспериментальных водосбора КВС: источник Карстовый в бассейне р. Кучук-Узенбаш; р. Кизилкобинка — продолжение КВС Красной пещеры; р. Аян — продолжение КВС источника Аянский. Все они — крупные поставщики подземного стока в реки Бельбек и Салгир, а также источники пресной питьевой воды.

В качестве потенциальных источников питания рек рассматриваются все типы вод, циркулирующие в бассейнах — воды атмосферных осадков; воды родников, в том числе эпикарстовые воды зоны коры выветривания карстующихся известняков мощностью до 20 м; глубокие подземные воды, обеспечивающие базисное питание водотоков в маловодные периоды; поверхностно-склоновые и почвенно-склоновые воды, формирование химического состава которых происходит в ходе взаимодействия с субстратом поверхности водосбора, и другие водопроявления.

Ожидается, что результаты исследования смогут ответить на вопрос практической значимости — возможна ли ресурсная оценка подземных составляющих стока в бассейнах с распространением карстовых пород.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ БАСЕЙНЫ

Бассейн р. Кучук-Узенбаш со створом в с. Многоречье (11.3 км²), а также бассейн р. Тонас с контрольными створами Птичий (7 км²) и Тонасу-5 (10.5 км²) располагаются в западной и восточной частях Главной гряды Крымских гор соответственно (рис. 1). Кучук-Узенбаш — левый приток р. Бельбек — берет начало на северных склонах Ялтинского массива Главной Гряды с отметками водораздельных вершин >1000 м. Речная сеть в пределах плато массива (яйлы)

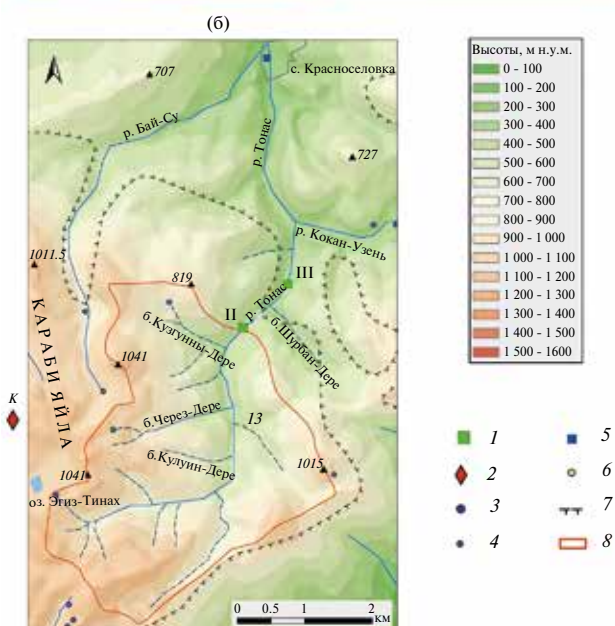
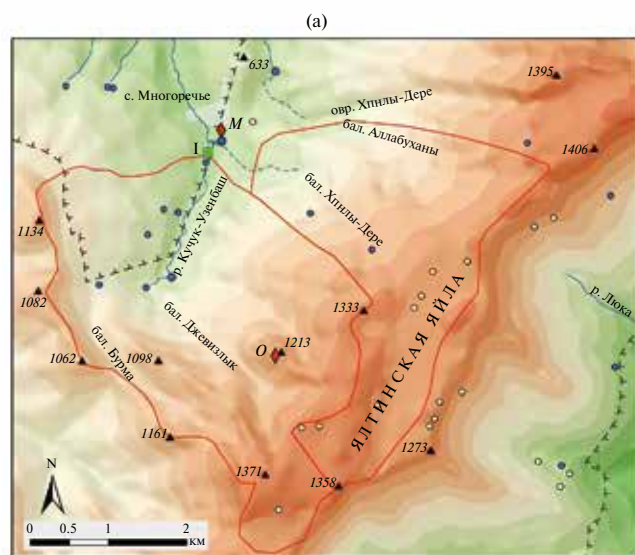


Рис. 1. Картограммы водосборов: а – р. Кучук-Узенбаш, б – р. Тонас. I – гидрологические створы (I – р. Кучук-Узенбаш – с. Многогоречье, II – р. Тонас – выше руч. Птичьего, III – р. Тонас – створ Тонасу-5); 2 – метеостанции (М – Многогоречье, О – Ольмесхыр, К – Караби); источники: 3 – крупные, 4 – мелкие, 5 – скважины; элементы рельефа: б – карстовые полости; границы: 7 – распространения верхнеюрских карбонатных пород, 8 – речных бассейнов.

отсутствует, атмосферные осадки почти полностью инфильтруются и питают подземный (карстовый) сток. Истоки р. Кучук-Узенбаш – карстовые источники, образующие ручьи в днищах глубоких балок правого борта долины. Домини-

рующее распространение на водосборе имеют водоносные интенсивно закарстованные верхнеюрские известняки, толщи которых отличаются высокой тектонической дислоцированностью и трещиноватостью, давшей начало развитию протяженных канаво-полостных систем. Это отражается на характере рельефа поверхности массива, особенно ее яйлинской части, в виде типичного карстового рельефа с обилием воронок, расщелин и слепых балок. Подстилающий слабопроницаемый цоколь сложен песчано-глинистыми, флишевыми и флишеидными отложениями средней юры.

Водосбор р. Тонас расположен к востоку от Карабийского горно-карстового массива Центрально-яйлинского горного района, орографически отделяет его от денудационных эрозионных низкогорий Восточно-Крымского горного района. Водосбор на юге ограничен главным водоразделом Крымских гор, включает ряд возвышенностей и скальных пиков с высотными отметками ~1000 м. В бассейне р. Тонас доминируют терригенно-карбонатные отложения. На склонах экспериментального водосбора встречаются выходы брекчиевидных верхнеюрских известняков, представляющие собой фрагменты гравигенных смещенных массивов (олистоцитов), отколовшиеся и оползшие от восточного края карстового плато. Западную часть водосбора слагают толщи зеленовато-серых алевитистых глин с прослоями мелкообломочных известняков, сменяющихся к восточной части водосбора глинами с прослоями сидеритов титонского и берриасского возраста.

Детальное описание водосборов и мониторинговой сети наблюдений приведено в [3]. Фоновые показатели увлажненности территории водосборов высокие, по данным выполненных наблюдений на метеостанциях за апрель–декабрь 2022 г. зафиксированы суммы осадков 559 (Многогоречье), 809 (Ольмесхыр) и 750 мм (Караби). Многоводная фаза гидрологического режима – холодный период года с ноября–декабря по март. Для рек характерен паводковый режим, паводки проходят преимущественно в зимне-весенний период, но могут возникать в течение всего года, за исключением устойчивой летне-осенней межени (с июля по сентябрь–октябрь).

Наиболее крупные паводки вызываются интенсивными ливневыми дождями.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В исследовании использовались данные гидролого-гидрохимического мониторинга 2021–2023 гг. по трем гидрологическим створам, которые охватывают основные фазы годового цикла водного режима в зоне формирования речного стока. Массив данных включал измеренные расходы воды Q (м³/с), результаты анализа проб воды по следующим показателям: водородный показатель pH; удельная электропроводность χ , мкСм/см; концентрации (мг/л) ионов Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , HCO_3^- , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- ; содержание растворенного кремния Si, мг/л. Количество измерений расход–проба по створам составило: р. Кучук-Узенбаш – 36, р. Тонас – Птичий – 29, р. Тонас – Тонасу-5 – 21. Створ Тонасу-5 в 2022 г. был закрыт и перенесен ниже по течению р. Тонас по причине разрушения створа в ходе крупного июньского паводка. Для проверки модели по створу р. Кучук-Узенбаш – с. Многогорье дополнительно использовалась независимая выборка химического состава воды, пробы которой отбирались наблюдателем поста посуточно в периоды высокого стока: с 26.02.2022 по 07.03.2022, с 22.11.2022 по 01.12.2022, с 23.12.2022 по 01.01.2023, с 17.02.2023 по 11.03.2023. Общий объем независимой выборки составил 51 пробу.

В качестве потенциальных источников речного стока рассматривались воды различных видов водопроявлений на водосборах: подземные родниковые с различным дебитом, атмосферные воды (дождевые воды, снег), поверхностно-склоновые воды (почвенно-склоновые), отобранные из временной дренажной сети в период максимального переувлажнения почвогрунтов. Общее число проб из подземных источников: в бассейне р. Кучук-Узенбаш – 72, в бассейне р. Тонас – 27. Воды атмосферных осадков представлены единой выборкой из 19 проб, которые отбирались на различных участках бассейнов. Поверхностно-склоновые воды представлены единичными пробами, отобранными из временной дренажной сети,

формирующейся на водосборах во время паводковых событий и в период активного таяния снега.

Детальный анализ химического состава перечисленных типов вод, выявленные закономерности изменения концентраций ионов с расходами воды и вертикальная химическая зональность представлены в работе [3].

МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Идентификация источников питания и их оценки выполнены с использованием метода анализа геохимических данных ЕММА, в котором сочетаются физическая модель смешения источников, построенная на принципе сохранения баланса воды и растворенных веществ, и статистическая процедура анализа – метод главных компонент (МГК) [16, 17].

Трехкомпонентная двухтрассерная модель смешения выражается в виде:

$$\begin{cases} Q_r = Q_1 + Q_2 + Q_3, \\ C1_r Q_r = C1_1 Q_1 + C1_2 Q_2 + C1_3 Q_3, \\ C2_r Q_r = C2_1 Q_1 + C2_2 Q_2 + C2_3 Q_3 \end{cases} \quad (1)$$

где Q – расход воды; $C1$ и $C2$ – концентрации первого и второго трассеров; нижние индексы: 1, 2, 3 – номер источника питания (составляющей речного стока); r – речной сток.

Решение этой системы относительно источников представляется в виде:

$$Q_1 = \frac{(C1_r - C1_3)(C2_2 - C2_3) - (C1_2 - C1_3)(C2_r - C2_3)}{(C1_1 - C1_3)(C2_2 - C2_3) - (C1_2 - C1_3)(C2_1 - C2_3)} Q_r, \quad (2)$$

$$Q_2 = \frac{C1_r - C1_3}{C1_2 - C1_3} Q_r - \frac{C1_1 - C1_3}{C1_2 - C1_3} Q_1, \quad (3)$$

$$Q_3 = Q_r - Q_1 - Q_2. \quad (4)$$

Расчет по модели выполняется на каждый момент времени измерения расхода воды в реке при известной концентрации трассеров. Концентра-

ции в источниках, как правило, представлены средними значениями концентраций выбранных трассеров по выборке. Детальное описание модели приведено в работах [7, 9].

Адаптация модели смешения выполняется путем построения и анализа диаграмм смешения, которые представляют собой ее геометрическое представление. Если химический состав речных вод контролируется процессом смешения трех преобладающих источников, диаграмма смешения строится в двухмерном пространстве, где по осям отображаются концентрации двух трассеров. Три вершины, соответствующие концентрациям трассеров в источниках, ограничивают поле смешения треугольной формы, внутри которого заключены точки, соответствующие пробам речных вод. При консервативном смешивании, правильном отборе трассеров и адекватности выбора источников пробы речных вод, как правило, оказываются внутри треугольника, стороны которого ограничивают его пространство смешения.

Модель смешения трех источников предусматривает использование двух трассеров, тогда как при гидрохимических съемках определяется большее число показателей (потенциальных трассеров) и заранее неизвестно, какие из них и в какой степени обладают свойствами трассеров. Для генерализации данных и конструирования так называемых “сложных” трассеров применяется метод многомерного статистического анализа – МГК [16], который позволяет выполнить операцию проецирования полного набора исходных гидрохимических индикаторов ($>>2$) в U -пространство, образованное взаимно-ортogonalными осями – главными компонентами. Каждая главная компонента (ГК_{*j*}) интерпретируется как сложный модельный трассер и представляет собой линейные комбинации всех исходных гидрохимических показателей (переменных):

$$ГК_1 = p_{1,1}X_1 + p_{1,2}X_2 + \dots + p_{1,j}X_j = \mathbf{Xp}_1,$$

$$ГК_2 = p_{2,1}X_1 + p_{2,2}X_2 + \dots + p_{2,j}X_j = \mathbf{Xp}_2, \quad (5)$$

$$\vdots$$

$$ГК_j = p_{j,1}X_1 + p_{j,2}X_2 + \dots + p_{j,j}X_j = \mathbf{Xp}_j$$

или в матричном виде:

$$\mathbf{ГК} = \mathbf{X}, \quad (6)$$

где $\mathbf{X} (i \times j)$ – матрицы исходных переменных, i – число измерений (проб), j – число независимых переменных, $\mathbf{P} (j \times j)$ – матрица коэффициентов перехода (матрица нагрузок или “loading”) из многомерного пространства в U -пространство, в которой каждый столбец представляет коэффициенты для одной главной компоненты, а каждая строка – коэффициенты для каждой переменной.

Матрица $\mathbf{ГК}$ имеет размерность исходной матрицы переменных ($i \times j$). Строки этой матрицы – координаты каждого исходного измерения (пробы) в новой системе координат, столбцы – проекции всех проб на новую координатную ось.

Качество МГК-модели с использованием первых двух ГК (размерность $2D$) оценивают долей их суммарной объясненной дисперсии λ_2 и анализом остатков ($\mathbf{E}$), представляющих собой разницу между рассчитанными по МГК-модели и измеренными концентрациями трассеров:

$$\mathbf{E} = \mathbf{X} - \sum_{j=1}^2 \mathbf{ГК}_j \mathbf{p}_j.$$

Величина λ_2 при корректно построенной МГК-модели должна быть 80–90% и более. Диаграмма смешения в этом случае выполняется в U -пространстве с использованием первых двух ГК, а решение модели смешения трех источников (уравнения (2)–(4)) выполняется с использованием их значений.

Применение модели смешения предполагает соблюдение некоторых условий: консервативность трассеров; контрастность источников, выраженная в различии их химических характеристик; низкая пространственная вариабельность концентрации трассеров в источниках.

Проверка гипотезы консервативности каждого потенциального трассера выполняется на основании анализа линейности связи между измеренными значениями химического показателя и остатков ($\mathbf{E}$), рассчитанных по МГК-модели [17]. Для принятия гипотезы консервативности рас-

пределение остатков должно представлять собой случайный нормально-распределенный “шум”.

Валидация модели смешения выполняется путем сопоставления расчетных концентраций трассеров каждой пробы по модели смешения (уравнение 1) и измеренных концентраций. Тесная корреляция между ними указывает на адекватность и достаточную точность модели. Декомпозиция матрицы исходных данных выполнялась в Microsoft Excel с использованием хеометрической надстройки Add-In [12].

При недостаточности данных наблюдений, характеризующих источники питания, в отдельных случаях применялся метод гидрологической аналогии – выборка проб водной массы установленного генезиса из одного бассейна проецировалась в соседний.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

МГК-модели и консервативность трассеров

Различные наборы гидрохимических характеристик проверялись на консервативность по каждому водосбору, при этом отбирались варианты МГК-модели с наиболее высокими значениями λ_2 . В качестве расчетных были приняты варианты, включающие набор из четырех трассеров с $\lambda_2 = 85\%$ (табл. 1).

Анализ графиков “остатки – измеренные значения” (рис. 2) показывает, что для размерности пространства смешения 2D распределение

остатков **Е** при исключении отдельных “отскакивающих” проб в большинстве случаев имеет случайный характер. Статистическая проверка указывает на случайность распределения остатков при уровнях значимости 0.05 и 0.01.

Анализ диаграмм смешения

С использованием матрицы **Р** по каждому водосбору были построены диаграммы смешения, в которых измеренные концентрации трассеров речных проб, спроецированные в пространство ГК1–ГК2, образуют поле смешения. В эти же *U*-пространства проецировались измеренные концентрации трассеров проб всех потенциальных источников питания (рис. 3), а также, соответственно, концентрации в пробах воды независимой выборки по р. Кучук-Узенбаш (рис. 3а) и замыкающего створа Тонасу-5 водосбора р. Тонас (рис. 3б). На диаграммах были определены “end-members” – по три вершины треугольных полей смешения, охватывающих почти все точки, соответствующие пробам речных вод, за исключением единичных “отскакивающих” точек. Вершины полей смешения соответствуют искомым источникам питания, в результате смешения которых формируется речная водная масса. В обоих водосборах источники питания получили одинаковую интерпретацию: эпикарстовый, почвенно-склоновый и базисный.

Эпикарстовый источник питания (ЭК). В работе [3] показано, что источники, разгружающиеся в речных бассейнах, проявляют высотную зональность, выражающуюся в изменении

Таблица 1. Характеристики МГК-моделей: объясненные дисперсии λ_j (%) главных компонент, трассеры и их коэффициенты перехода в *U*-пространство

Бассейн	ГК _{<i>j</i>}	λ_j	$\Sigma \lambda_j$	Коэффициенты перехода трассеров (Р -матрица)			
				χ	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	Si
р. Кучук-Узенбаш – с. Многоречье	ГК ₁	68	68	-0.565	-0.444	-0.479	-0.504
	ГК ₂	17	85	0.089	0.8	-0.479	-0.349
	ГК ₃	10	95	0.112	-0.144	-0.712	0.678
	ГК ₄	5	100	0.813	-0.377	-0.183	-0.406
				χ	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻
р. Тонас – Птичий	ГК ₁	58	58	-0.583	-0.563	-0.381	-0.445
	ГК ₂	27	85	0.234	-0.251	-0.708	0.617
	ГК ₃	9	94	0.197	0.596	-0.589	-0.509
	ГК ₄	6	100	0.753	-0.514	0.079	-0.403

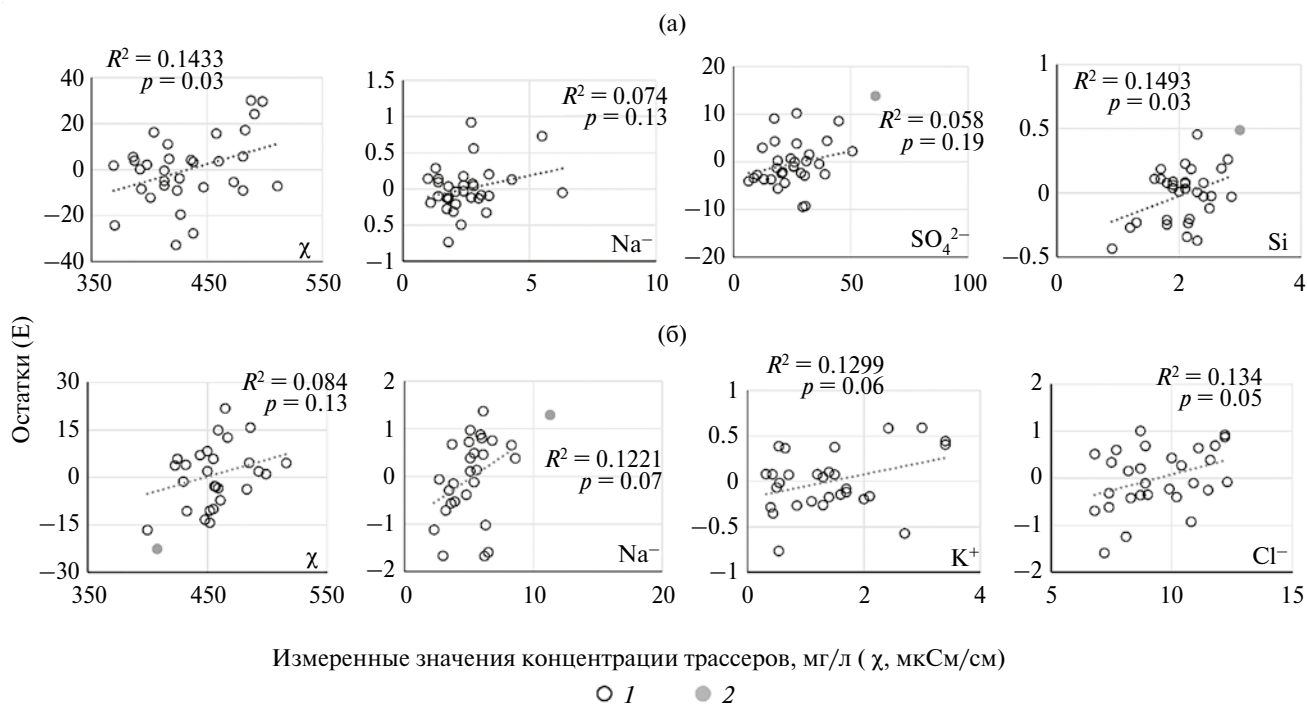


Рис. 2. Графики связи “остатки (E) — измеренные значения” на уровне 2D: а — р. Кучук-Узенбаш — с. Многогоречье, б — р. Тонас — Птичий. 1 — речные пробы, 2 — “отклоняющиеся значения”, p — вероятность отсутствия корреляционных связей на графиках.

химического состава воды в высотном профиле водосбора. Трещинно-карстовые гидрокарбонатные кальциевые воды родников, циркулирующие в верхнем ярусе бассейнов (>700 м н.у.м.) и приуроченные к участкам развития эпигенного открытого карста в бассейнах, согласно схеме гидродинамической зональности подземных вод [11], рассматривались как представители эпикарстовых вод.

Под почвенно-склоновым (ПСК) источником понимаются воды, стекающие по поверхности склонов бассейна, а также дренируемые из почвенно-делювиальных слоев в диапазоне глубин ближайших эрозионных врезов.

Базисный источник питания (БС) — элемент стока сложного состава, включающий в себя различные виды устойчивого подземного питания, формирующий базисную часть гидрографа стока. Предполагается, что БС представлен преимущественно трещинно-жильными водами замедленной циркуляции, мигрирующими к основанию водоносной толщи, разгрузка которых приурочена к низким абсолютным отметкам.

На диаграмме смешения **бассейна р. Кучук-Узенбаш** (рис. 3а) источник питания ЭК представлен осредненной концентрацией шести проб, отобранных из род. Беш-Текне, выходящего на высоте 1130 м н.у.м. в приповерхностной зоне карстующихся известняков Ялтинской яйлы. На диаграмме в непосредственной близости от него есть точка, соответствующая осредненным концентрациям проб воды из род. Эки-Текне, разгружающегося в верхней части правого склона водосбора р. Кучук-Узенбаш на отметке 890 м н.у.м. и являющегося удаленным пунктом разгрузки подземных вод в данной эпикарстовой зоне.

Источник питания ПСК на той же диаграмме (рис. 3а) представлен осредненной концентрацией четырех проб, отобранных из род. Юрка-II. Склоновый родник Юрка-II, расположенный на левом склоне Кучук-Узенбашской балки, имеет несколько выходов вниз по склону в песчано-глинистых отложениях средней юры. В период обследования весь склон под нижним выходом родника был переувлажнен, при этом вода стекала по поверхности в русло р. Кучук-Узенбаш. Осредненная проба из аналогичного род. Чок-Су,

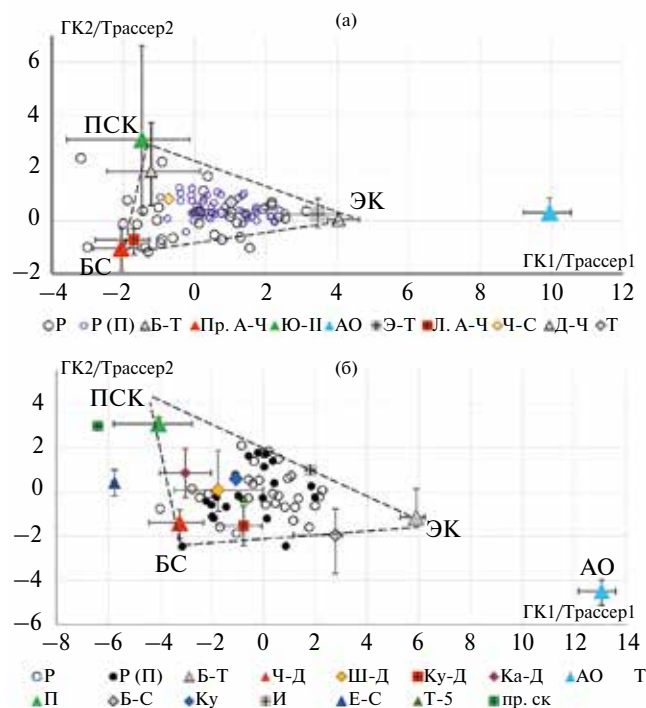


Рис. 3. Диаграммы смешения вод в U -пространстве: а – р. Кучук-Узенбаш, б – р. Тонас – выше руч. Птичьего. Источники питания: БС – базисный сток, ПСК – почвенно-склоновые воды, ЭК – эпикарстовый сток, АО – атмосферные осадки. Пробы: Р – речные, Р (П) – речные проверочной выборки, Р (Т-5) – речные из створа Тонасу-5; родников: Б-Т – Беш-Текне, Л. А-Ч – Левый Азменын-Чокрак, Пр. А-Ч – Правый Азменын-Чокрак, Ч-С – Чок-Су, Ю-П – Юрка-П, Э-Т – Эки-Текне, Д-Ч – Дарха-Чокраклы, Т – Тюллюк, Ку – Кузгунны (яйла) Т-5 – Тонасу-5; водопроявлений: Ч-Д – балка Через-Дере, Ш-Д – балка Шурбан-Дере, Ку-Д – балка Кузгунны-Дере, Ка-Д – балка Карагач-Дере, П – руч. Птичий, Б-С – истоки р. Бай-Су, И – колодец Испанец, Е-С – скв. Ени-Сала (с. Красноселовка), пр. ск – временный родник на правом склоне.

расположенного выше по склону от род. Юрка-П, также тяготеет к источнику ПСК на диаграмме (рис. 3а), но заметно отстоит от нее, располагаясь по краю “облака” речных проб.

Источник питания БС этого бассейна представлен осредненной концентрацией пяти проб предположительно трещинно-жильных вод род. Прав. Азменын-Чокрак, отобранных в зимний период во время низкого стока, когда содержание сульфатов в пробе достигало наивысших значений ≥ 50 мг/л. Пробы речных вод, отобранные в маловодные периоды, также тяготеют к этому источнику и имеют повышенные

содержания сульфатов. Это подтверждает интерпретацию данной составляющей как источника питания БС, формирующего сток реки в межень.

На диаграмме смешения вод бассейна р. Тонас (рис. 3б) источник БС представлен тремя пробами, отобранными из родника, выходящего в днище балки Через-Дере. Пробы воды из других балок (Шурбан-Дере, Карагач-Дере, Кузгунны-Дере) этого же водосбора не занимают краевого положения и не рассматриваются как представители источника БС. Речные пробы р. Тонас периода глубокой межени на диаграмме также тяготеют к источнику питания БС, что подтверждает генезис этой водной массы. Одна из проб из створа Тонасу-5 занимает крайнее положение – при замыкании пространства смешения на эту пробу большинство речных проб располагаются внутри области смешения (рис. 3б).

В бассейне р. Тонас не удалось получить репрезентативные данные о химическом составе эпикарстовых вод, поэтому выборка проб воды из род. Беш-Текне из бассейна р. Кучук-Узенбаш была спроецирована в U -пространство р. Тонас. Осредненные концентрации этих проб использованы для определения места источника питания ЭК на диаграмме смешения (рис. 3б). Локализация этого источника подтверждается его краевым положением на диаграмме, а также близким расположением проб вод предположительно эпикарстового генезиса, отобранных на яйле Караби (колодец Испанец, истоки р. Бай-Су).

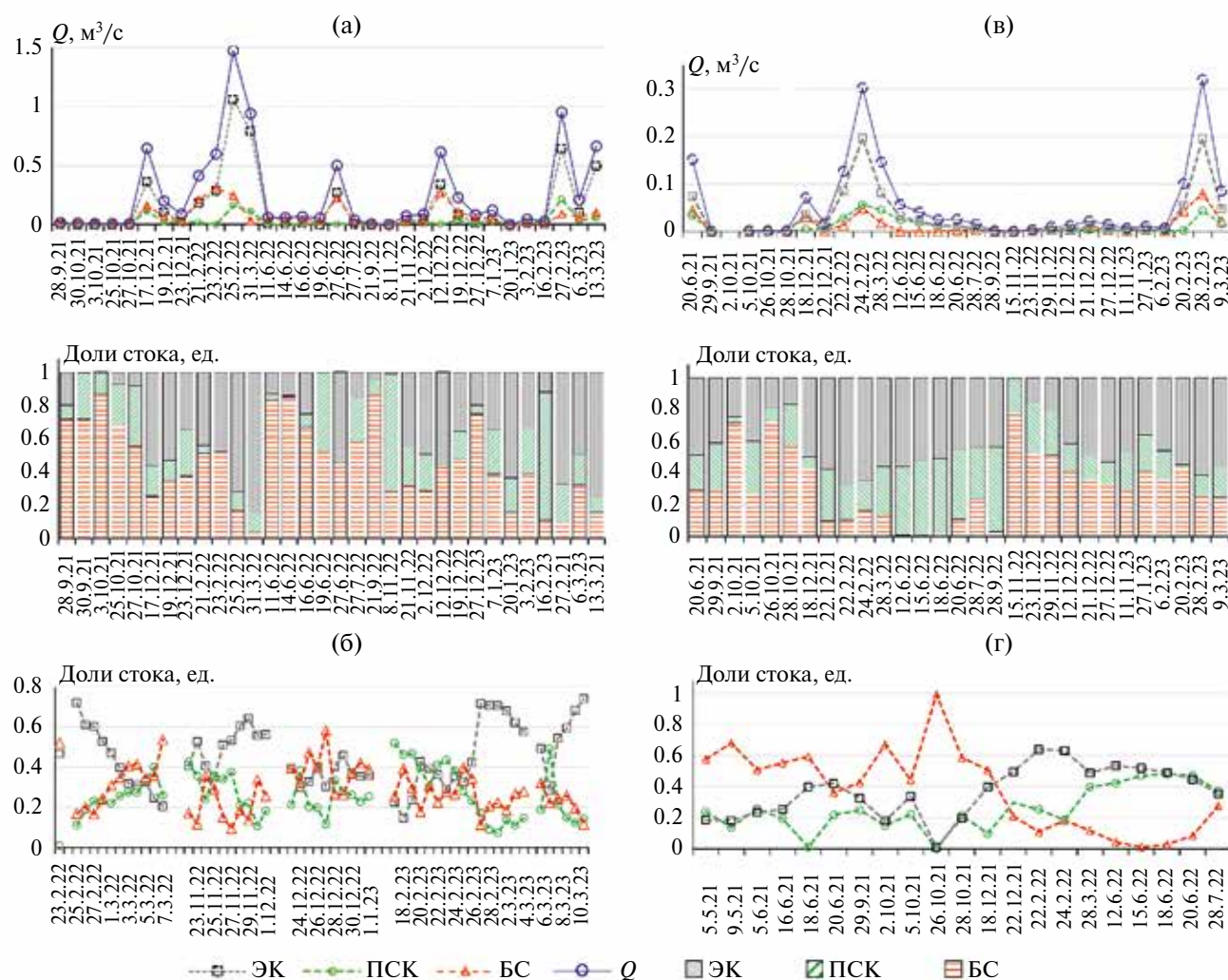
Пробы воды, отобранные на левом склоне водосбора р. Тонас из руч. Птичьего, а также из появляющегося после снеготаяния временного родника на противоположном склоне, занимают крайнее положение на диаграмме, что позволяет считать их представителями источника питания ПСК. Эти пробы демонстрируют большие вариации химического состава этого типа вод. Положение вершины источника ПСК скорректировано в пределах этих вариаций таким образом, чтобы исключить отрицательные значения долей источников в последующих расчетах (рис. 3б), что не сказывается существенно на их соотношениях.

Таблица 2. Концентрации трассеров (мг/л; χ – мкСм/см) в источниках питания, ограничивающих поле смешения речных вод

Источник питания	р. Кучук-Узенбаш				р. Тонас			
	χ	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	Si	χ	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻
Эпикарстовый	313	0.84	5.5	1.4	313	0.84	0.2	5.33
Почвенно-склоновый	424	6.80	14.8	2.51	571	7.83	0.43	14.1
Базисный	490	2.44	57.9	2.12	507	6.70	5.0	9.6

При выпадении осадков на плато их основная масса попадает в эпикарст – на диаграммах смешения (рис. 3) источники эпикарстовых вод и атмосферных осадков располагаются рядом. После этого воды фильтруются в зону аэрации и глубже с дальнейшей трансформацией. Участки эпикарста, расположенные у бровки плато,

частично разгружают свои воды на склонах. Здесь условия для фильтрации хуже вследствие возрастания уклонов и развития примитивных эрозионных форм (борозд, промоин). В условиях маломощности и высокой скелетности почв эпикарстовые воды местами пронизывают их в латеральном направлении, попутно приоб-

**Рис. 4.** Разделение речного стока по источникам питания на даты съемки: а – р. Кучук-Узенбаш – с. Многогоречье, б – р. Кучук-Узенбаш (проверочная выборка), в – р. Тонас – выше руч. Птичьего, г – р. Тонас – Тонасу-5. Источники питания: ЭК, ПСК, БС (расшифровка в тексте), Q – расход воды в створе реки.

ретая черты почвенных растворов и переходя в склоновый сток. Поэтому на диаграммах (рис. 3) источник ЭК занимает промежуточное положение между АО – ПСК. Химический состав источников питания по трассерам приведен в табл. 2.

Оценки составляющих стока, валидация модели

Расчет долей/расходов источников выполнен по уравнению (2), а результаты расчета на каждую дату измерения расхода воды представлены в графическом виде на рис. 4.

Для бассейна р. Кучук-Узенбаш валидация модели смешения выполнена в двух вариантах – для тестируемой выборки и для проверочной выборки. В бассейне р. Тонас проверка выполнена по двум выборкам: в створе поста выше руч. Птичьего, по которой выполнялась адаптация модели, и в замыкающем створе Тонасу-5. Сравнение модельных и измеренных концентраций трассеров приведено на рис. 5.

Коэффициент корреляции r между рядами по калибровочной выборке р. Кучук-Узенбаш для

Si составляет 0.69, по остальным показателям в диапазоне 0.84–0.97, по проверочной выборке для Si $r = 0.40$, что значительно хуже при сравнении с калибровочной выборкой, но для остальных трассеров коэффициенты $r = 0.78–0.97$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обоснованность ЕММА-модели

Консервативность трассеров, определение числа источников питания, их выбор, пространственные и временные вариации химического состава в источниках – все это составляет неопределенности модели смешения. Поэтому использование диагностических инструментов, таких как определение числа стабильных источников (ранга массива) посредством разложения исходной матрицы гидрохимических данных на линейные комбинации исходных переменных (уравнение 5–6), контроль консервативности растворенных веществ через анализ зависимостей “остатки – измеренные значения”, позволяют снизить соответствующие модельные неопределенности, а включение в набор трассеров не двух, а нескольких показателей повышает надежность решения.

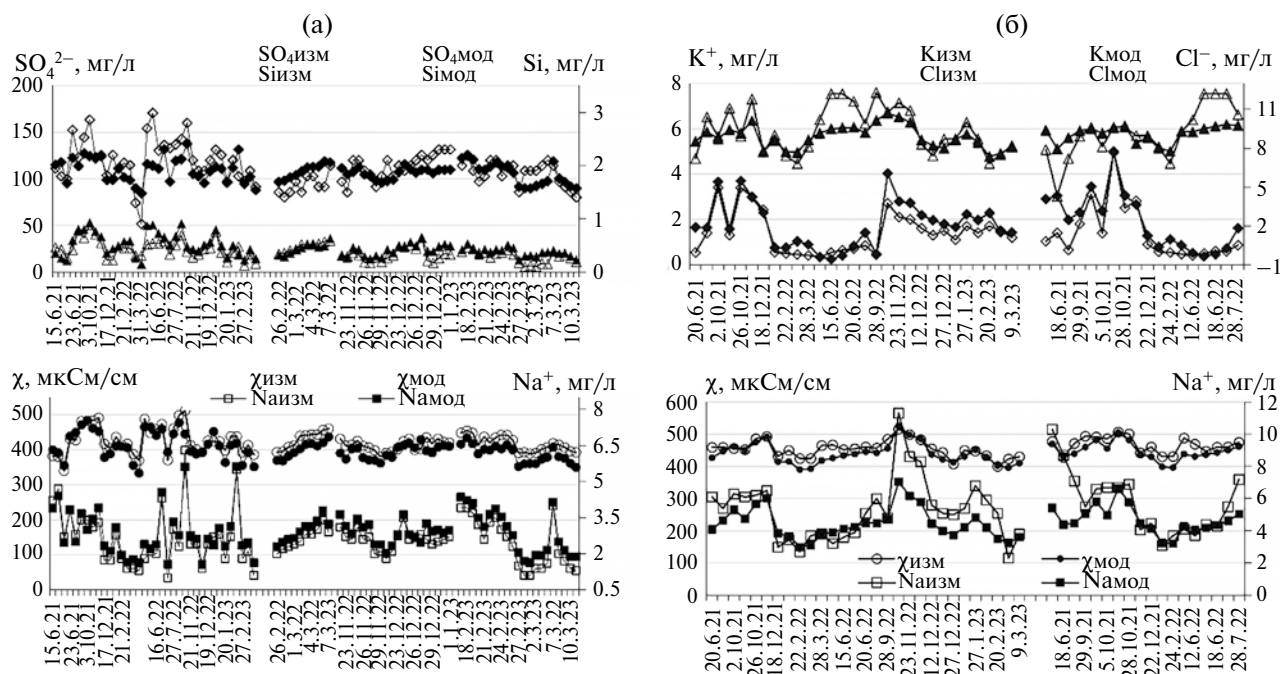


Рис. 5. Измеренные и модельные концентрации трассеров, используемые в моделях смешения. а – р. Кучук-Узенбаш: калибровочная выборка с 15.06.2021 по 27.02.2023, проверочная выборка с 26.02.2022 по 10.03.2023; б – р. Тонас: створ выше устья руч. Птичьего с 20.06.2021 по 09.03.2023, створ Тонасу-5 – с 16.06.2021 по 28.07.2022.

Выполненный ранее детальный анализ химического состава природных вод на исследуемых объектах [3] показал, что для водосборов характерна вертикальная зональность концентраций растворенных веществ. Зафиксированы хоть и не значительные, но все же контрасты химического состава вод, которые позволяют построить диаграммы смешения речных вод, установить источники питания и выполнить их интерпретацию.

Величины объясненной дисперсии суммы двух первых ГК-моделей смешения (табл. 1) составляют 85%. Это означает, что для принятых наборов химических трассеров совокупную вариацию концентраций можно удовлетворительно описать двумя ГК-модели гидрохимической

матрицы, т. е. для моделирования процесса смешения вод нужно использовать вариант двух-трассерной трехкомпонентной модели смешения.

Результаты сравнения модельных и измеренных концентраций трассеров по калибровочной и проверочной выборкам р. Кучук-Узенбаш (рис. 5а) позволяют утверждать, что применяемая модель с высокой точностью воспроизводит измеренные значения χ , Na^+ , SO_4^{2-} . Для Si сходство модельных значений с измеренными в целом удовлетворительное, но локальные экстремумы систематически недооцениваются или переоцениваются. В случае р. Тонас сходство модельных и измеренных концентраций трассеров в створе выше руч. Птичьего – высокое, для сравниваемых

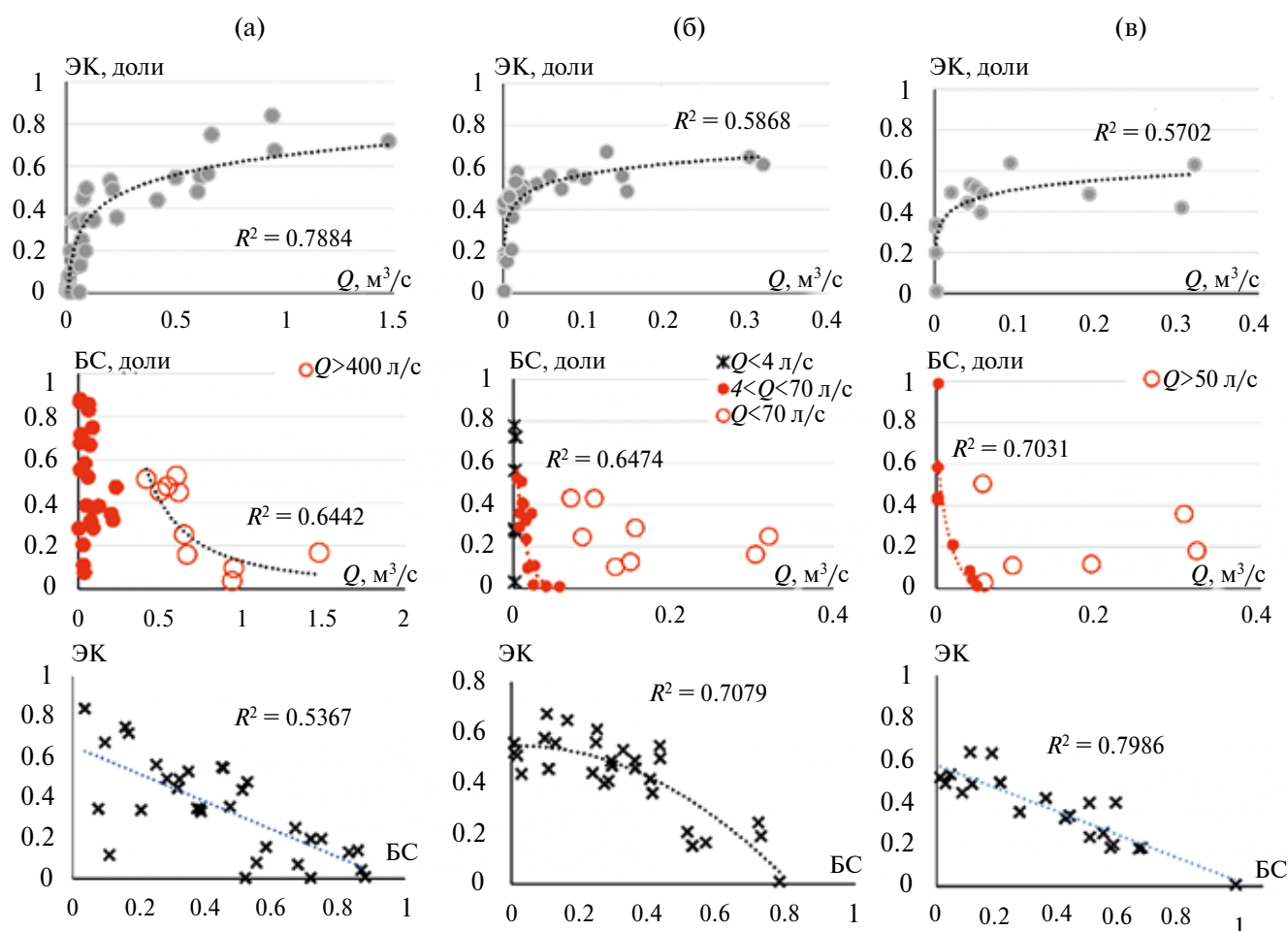


Рис. 6. Зависимости долей эпикарстового (ЭК), базисного (БС) видов стока от расхода воды (Q) и их соотношения (ЭК/БС) в замыкающих створах: а – р. Кучук-Узенбаш, б – р. Тонас – выше руч. Птичьего, в – р. Тонас – Тонасу-5.

рядов $r > 0.88$. В замыкающем створе Тонасу-5 качество модели несколько хуже (рис. 5б).

Связь долей источников питания с расходами

Анализ зависимостей долей источников питания от расходов в замыкающих створах (рис. 6) показывает, что на всех водосборах существует нелинейная связь источника ЭК с расходами. Теснота связей $R^2 > 0.57$ позволяет считать их расчетными, что дает возможность оценивать вклад источника ЭК в формирование суммарного речного стока по соответствующим логарифмическим зависимостям (рис. 6). Это открывает возможности уточнения оценки ресурсов эпикарстового стока.

Для источника питания БС статистические связи с расходами проявляются на водосборах в определенных диапазонах расходов (рис. 6). На водосборе р. Кучук-Узенбаш такая зависимость отчетливо проявляется при $Q > 400$ л/с ($R^2 = 0.64$), на водосборе р. Тонас зависимости обнаруживаются только при низких расходах: в створе Тонасу-5 при $Q < 50$ л/с ($R^2 = 0.7$), в створе Птичьем – при $Q < 70$ л/с ($R^2 = 0.37$).

Между долями источников питания ЭК и БС во всех водосборах отмечаются обратные линейные зависимости (рис. 6), наиболее тесные на р. Тонас ($R^2 > 0.7$). Эмпирические зависимости могут использоваться для ресурсной оценки вклада источника питания БС в речной сток. Тесных связей доли источника ПСК с расходом воды не обнаруживается. Этот источник выглядит как независимая составляющая стока бассейнов, обусловленная главным образом режимом поступления атмосферных осадков на водосбор, а также дренажными свойствами его поверхности. Ресурсная оценка поверхностно-склоновой составляющей стока возможна на основе балансовых расчетов.

Сравнительный анализ составляющих стока по паводкам и по бассейнам

Доступные материалы измерений пока не позволяют проанализировать посуточную и внутрисуточную взаимную динамику источников питания в связи с изменением водности рек.

Таблица 3. Осредненные значения долей источников питания в речном стоке

Источник питания	Доля стока в реке, %		Среднее
	р. Кучук-Узенбаш	р. Тонас	
Эпикарстовый	35	43	39
Почвенно-склоновый	20	26	23
Базисный	45	31	38

Однако анализ отдельных выдающихся паводковых событий показывает, что в обоих бассейнах доля эпикарстовых вод существенная, на пиках паводков отмечается резкий ее рост. Отдельно обращает на себя внимание паводок на р. Кучук-Узенбаш в июне 2021 г. с оцененным на пике $Q = 7$ м³/с. На спаде паводка фиксируется снижение доли источника питания ЭК за счет резкого увеличения доли источника БС, что может свидетельствовать о проявлении поршневого эффекта, характерного для КВС с высокой степенью заполнения емкостных запасов.

Сравнение осредненных долей источников питания в речном стоке двух водосборов за исследуемый период (табл. 3) показывает, что доля эпикарстовых вод в бассейне р. Тонас заметно выше (43%), чем в бассейне р. Кучук-Узенбаш (35%), хотя по степени закарстованности первый существенно уступает второму. Причина этому – общая маловодность р. Тонас из-за незначительного карстового питания, так как ее водосбор в основном сложен некарстующимися породами. При этом, если эпикарстовая зона в бассейне р. Тонас формируется в относительно маломощных известняках, развитых на незначительных площадях, то для формирования глубинных карстовых вод вообще нет соответствующих коллекторов. Эпикарстовые воды бассейна р. Тонас связаны с массивами смешанных раздробленных известняковых блоков, лежащих в верхней части бассейна у бровки Караби-яйлы. Эти блоки формируют обвальную-осыпную и оползневую шлейфы ниже по склону, которые могут достигать даже русла Тонаса.

Терригенно-карбонатные отложения западной части водосбора р. Тонас обладают слабыми коллекторными свойствами и малыми емкостными характеристиками. Поэтому средняя доля базисных карстовых вод р. Тонас незначительна

и составляет 31% против 45% в бассейне р. Кучук-Узенбаш (табл. 3). Водосбор р. Кучук-Узенбаш делится на две части: обширную яйлинскую и склоновую. Атмосферные осадки, выпадающие на яйле, инфильтруются в эпикарстовую зону, затем питают глубокие карстовые водоносные горизонты, поэтому доля источника питания БС в стоке велика.

Эпикарстовые воды в бассейне р. Кучук-Узенбаш разгружаются преимущественно в верхнем ярусе склона (родники Беш-Текне, Эки-Текне), а ниже на склонах начинает преобладать склоновая эрозия. Левобережье р. Кучук-Узенбаш, представляющее в геоморфологическом плане вскрытый эрозией среднеюрский флиш, — преимущественно та часть водосбора, которая обеспечивает ~20% питания реки почвенно-склоновыми водами (табл. 3). В бассейне р. Тонас вследствие слабой зарегулированности карстом и повышенной доли эпикарстовой составляющей создаются благоприятные условия для латеральной миграции вод и формирования почвенно-склоновой компоненты стока, которая составляет здесь 26% в общем стоке реки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для экспериментальных речных бассейнов Горного Крыма проанализированы диаграммы смешения природных вод, обоснованы источники питания речного стока и выполнена их интерпретация. В качестве стабильных источников питания речного стока закарстованных водосборов выделены: эпикарстовые воды, формирующиеся в приповерхностной (до 5 м) трещиноватой и выветрелой зоне на плато или в толще обвально-осыпных шлейфов на склонах; почвенно-склоновые воды; базисные воды, поступающие из зоны аэрации карстовых массивов и циркулирующие у контакта с подстилающими водоупорными породами.

На основе применения двухтрассерной, трехкомпонентной модели смешения выполнено расчленение гидрографов рек Тонас и Кучук-Узенбаш с оценкой долей каждого источника питания на конкретные даты гидрохимической съемки. Полученный массив взаимоувязанных расчетных значений по каждой компоненте по-

зволил исследовать структуру стока в исследуемых бассейнах за 2021–2023 гг.

Существенный вклад в речной сток малых рек вносят эпикарстовые воды. Их доли увеличиваются в период паводков, закономерно возрастают с увеличением расхода воды в замыкающих створах, подчиняясь логарифмическим зависимостям. Доли базисного стока по отношению к долям эпикарстовых вод уменьшаются. Статистически значимые связи между долями базисной составляющей рек и их водностью прослеживаются при определенных условиях: для р. Кучук-Узенбаш — при расходах > 400 л/с, для р. Тонас — до 50–70 л/с.

Общая тенденция в сезонном разрезе для исследуемых водосборов — увеличение доли эпикарстового стока в зимний период, что обусловлено увеличением общего увлажнения бассейнов. Изменение долей базисной составляющей речного стока находится в противофазе с динамикой эпикарстовой составляющей. Почвенно-склоновая компонента в бассейнах — случайная составляющая стока.

Выявленные эмпирические зависимости изменения составляющих речного стока от расходов воды в замыкающих створах, а также связи между долями эпикарстового и базисного видов стока представляют основу для дальнейшей их ресурсной оценки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амеличев Г.Н., Вахрушев Б.А., Дублянский В.Н. Гидродинамика и эволюция спелеоморфогенеза Амткельской карстовой системы (Западная Абхазия) // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2007. Т. 3. № 2. С. 52–60.
2. Вахрушев Б.А., Гигинейшвили Г.Н., Дублянский В.Н., Цвет А.Л. Гидрология и палеогидрология Амткельского карстового района // Тр. Геогр. общества Грузинской ССР. Тбилиси, 1990. Т. XVIII С. 31–39.
3. Губарева Т.С., Амеличев Г.Н., Гарцман Б.И., Токарев С.В., Хрусталева Л.И., Морейдо В.М. Ионный состав генетических типов природных вод малых речных бассейнов Горного Крыма // Вод. ресурсы. 2024. В печати.

4. Губарева Т.С., Болдескул А.Г., Трегубов О.Д., Тарбева А.М., Шамов В.В., Лебедева Л.С., Луценко Т.Н. Экспресс-диагностика источников питания малой арктической реки по результатам краткосрочной гидрологической съемки (Чаунская низменность, Чукотка) // Вод. ресурсы. 2023. Т. 50. № 1. С. 15–27.
5. Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Василенко Н.Г. Источники формирования речного стока в зоне многолетней мерзлоты: оценка методами трассерной гидрологии по данным режимных гидрохимических наблюдений // Криосфера Земли. 2018. Т. 22. № 1. С. 32–43.
6. Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Ефимова Л.Е., Терский П.Н., Белякова П.А., Казачук А.А. Идентификация и оценка источников питания стока заболоченного водосбора в бассейне реки Западная Двина // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2022. Т. 4. № 2. С. 183–201.
7. Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Солопов Н.В. Модель смешения четырех источников питания речного стока с использованием гидрохимических трассеров в задаче разделения гидрографа // Вод. ресурсы. 2018. Т. 45. № 6. С. 583–595.
8. Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Болдескул А.Г., Кожевникова Н.К. Компоненты стока малых водосборов Сихотэ-Алиня: обобщение результатов полевых измерений и трассерного моделирования // Изв. РАН. Сер. географическая. 2019. № 6. С. 126–140.
9. Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Болдескул А.Г., Кожевникова Н.К. Разделение гидрографа стока на генетические составляющие // Метеорология и гидрология. 2015. № 3. С. 97–108.
10. Кичигина Н.В., Губарева Т.С., Шамов В.В., Гарцман Б.И. Трассерные исследования формирования речного стока в бассейне озера Байкал // География и природ. ресурсы. 2016. № S5. С. 60–69.
11. Климчук А.Б. Эпикарст: гидрогеология, морфогенез и эволюция. Симферополь: Сонат, 2009. 111 с.
12. Померанцев А.Л. Хемометрика в Excel: учебное пособие. Томск.: Изд-во Томского политех. ун-та, 2014. 435 с.
13. Шамов В.В., Гарцман Б.И., Губарева Т.С., Кожевникова Н.К., Болдескул А.Г. Экспериментальные исследования генетической структуры стока с помощью химических трассеров: постановка задачи // Инженерные изыскания. 2013. № 1. С. 60–69.
14. Blaen P.J., Hannah D.M., Brown L.E., Milner A.M. Water source dynamics of high Arctic river basins // Hydrol. Process. 2014. 28. P. 3521–3538.
15. Bugaets A., Gartsman B., Gubareva T., Lupakov S., Kalugin A., Shamov V., Gonchukov L. Comparing the runoff decompositions of small experimental catchments: end-member mixing analysis (EMMA) vs. hydrological modelling // Water. 2023. V. 15. № 4. 752.
16. Christophersen N., Hooper R.P. Multivariate analysis of streamflow chemical data: The use of principal component analysis for the end-member mixing problem // Water Resour. Res. 1992. V. 28. № 1. P. 99–107.
17. Hooper R.P. Diagnostic tools for mixing models of stream water chemistry. // Water Resour. Res. 2003. V. 39. 1055.
<http://dx.doi.org/10.1029/2002WR001528>
18. Hugenschmidt C., Ingwersen J., Sangchan W., Sukvanachaiikul Y., Duffner A., Uhlenbrook S., Streck T. A three-component hydrograph separation based on geochemical tracers in a tropical mountainous headwater catchment in northern Thailand // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2014. V. 18. P. 525–537.
19. Joerin C., Beven K.J., Iorgulescu I., Musy A. Uncertainty in hydrograph separations based on geochemical mixing models // J. Hydrol. 2002. V. 255. P. 90–106.
20. Klaus J., McDonnell J.J., Jackson C.R., Du E., Griffiths N.A. Where does streamwater come from in low-relief forested watersheds?: a dual-isotope approach // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2015. V. 19. P. 125–135.
21. Liu F., Bales R.C., Conklin M.H., Conrad M.E. Streamflow generation from snowmelt in semi-arid, seasonally snow-covered, forested catchments, Valles Caldera, New Mexico // Water Resour. Res. 2008. V. 44. W12443.
<https://doi.org/10.1029/2007WR006728>
22. Munyaneza O., Wenninger J., Uhlenbrook S. Identification of runoff generation processes using hydro-metric and tracer methods in a meso-scale catchment in Rwanda // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2012. V. 16. P. 1991–2004.
23. Rahman K., Besacier-Monbertrand A.L., Castella E., Lods-Crozet B., Ilg C., Beguin O. Quantification of the daily dynamics of streamflow components in a small alpine watershed in Switzerland using end member mixing analysis // Environ. Earth Sci. 2015. V. 74. P. 4927–4937.
24. Schmieder J., Hanzer F., Marke T., Garvelmann J., Warscher M., Kunstmann H., Strasser U. The importance of snowmelt spatiotemporal variability for isotope-based hydrograph separation in a high-elevation catchment // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2016. V. 20. P. 5015–5033.
25. Scholl M.A., Shanley J.B., Murphy S.F., Willenbring J.K., Occhi M., González G. Stable-isotope and solute-chemistry approaches to flow characterization in a forested

- tropical watershed Luquillo Mountains, Puerto Rico // *Appl. Geochem.* 2015. V. 63. P. 484–497.
26. Soulsby C., Petry J., Brewer M.J., Dunn S.M., Ott B., Malcolm I.A. Identifying and assessing uncertainty in hydrological pathways: a novel approach to end member mixing in a Scottish agricultural catchment // *J. Hydrol.* 2003. V. 274. P. 109–128.
27. Viennet D., Lorette G., Labat D., Fournier M., Sebilo M., Araspin O., Crançon P. Mobile sources mixing model implementation for a better quantification of hydrochemical origins in allogenic karst Outlets: Application on the Ouyse Karst // *System. Water.* 2023. V. 15. 397. <https://doi.org/10.3390/w15030397>
28. Wilson A.M., Williams M.W., Kayastha R.B., Racoviteanu A. Use of a hydrologic mixing model to examine the roles of meltwater, precipitation and groundwater in the Langtang River basin, Nepal // *Ann. Glaciol.* 2016. V. 57. P. 155–168.
29. Wu J.K., Wu X.P., Hou D.J., Liu S.W., Zhang X.Y., Qin X. Streamwater hydrograph separation in an alpine glacier area in the Qilian Mountains, northwestern China // *Hydrol. Sci. J.* 2016. V. 61. P. 2399–2410.

ASSESSMENT OF RIVER RUNOFF COMPONENTS IN THE CRIMEAN MOUNTAINS. 1. RUNOFF OF SMALL RIVERS

T. S. Gubareva^{a, *}, G. N. Amelichev^{a, b}, B. I. Gartsman^{a, c}, S. V. Tokarev^a, B. A. Vakhrushev^{a, b}, V. G. Naumenko^b, Ev. G. Amelichev^{a, b}, I. B. Vakhrushev^{a, b}

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

^b*Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, 295007 Russia*

^c*Institute of Natural-Technical Systems, Sevastopol, 299011 Russia*

*e-mail: tgubareva@bk.ru

For experimental river basins in the Crimean Mountains, an assessment of the components of river flow was carried out based on the EMMA methodology. The following components of river runoff in karst watersheds are identified: epikarst waters, soil-slope waters and baseflow waters circulating at the contact with underlying impermeable rocks. A significant component of the flow of small rivers consists of epikarst waters. Their proportion in the gauging sections is increasing during floods, naturally increasing with increasing water discharge, obeying logarithmic dependencies. The proportions of baseflow water relative to the proportions of epikarst waters are decreasing.

Keywords: runoff components, chemical tracers, river catchments, karst, Crimean Mountains

УДК 556.5:556.3:551.44

ОЦЕНКА СОСТАВЛЯЮЩИХ РЕЧНОГО СТОКА ГОРНОГО КРЫМА. 2. СТОК КАРСТОВЫХ ВОДОНОСНЫХ СИСТЕМ¹

© 2024 г. Т. С. Губарева^{a, *}, Г. Н. Амеличев^{a, b}, С. В. Токарев^{a, b}, Б. А. Вахрушев^{a, b},
Б. И. Гарцман^{a, c}, В. Г. Науменко^b, Е. Г. Амеличев^{a, b}, И. Б. Вахрушев^{a, b}

^aИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

^bКрымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, 295007 Россия

^cИнститут природно-технических систем РАН, Севастополь, 299011 Россия

*e-mail: tgubareva@bk.ru

Поступила в редакцию 08.03.2024 г.

После доработки 20.05.2024 г.

Принята к публикации 20.05.2024 г.

Для экспериментальных бассейнов карстовых водоносных систем Горного Крыма выполнена адаптация трехкомпонентной модели смешения с использованием геохимических трассеров. На ее основе установлены следующие стабильные источники питания: эпикарстовый сток, формирующийся преимущественно в приповерхностной трещиноватой и выветрелой зоне карстующихся пород; поверхностно-склоновый сток, различающийся по механизму формирования; базисный карстовый сток, включающий смесь подземных вод зон аэрации карстовых массивов ниже эпикарста и фреатической, обеспечивающий базисную часть гидрографа стока. Существенную долю питания в стоке карстовых водоносных систем составляют эпикарстовые воды (>30%). Для составляющих стока выявлены тесные эмпирические связи их долей с расходами воды в замыкающих створах.

Ключевые слова: карстовые водоносные системы, источники питания, химические трассеры, ЕММА-модель, Горный Крым.

DOI: 10.31857/S0321059624060035 **EDN:** VPPGQC

ВВЕДЕНИЕ

Карстовые водоносные системы (КВС) — специфические гидрогеологические объекты с интенсивным водообменом, в результате которого формируются сложные многоуровневые структуры фильтрационной среды, характеризующейся пространственной неоднородностью емкостных и фильтрационных свойств. Формирование КВС часто сопровождается активным спелеогенезом. Главное отличие водосборов КВС от речных водосборов — отсутствие сети постоянных поверхностных водотоков, действующих на протяжении всего водного цикла, а при наличии таковых их поверхностный сток поглощается и переходит в подземный.

Воды КВС отличаются высоким качеством и являются источником пресной питьевой воды,

но обладают низкой способностью самоочищения [3, 14]. Изучение структуры, режима и механизмов формирования стока КВС, характера взаимодействия потоков в водоносных горизонтах необходимы для эффективного управления водными ресурсами регионов с широким развитием карста.

Трассерные методы наиболее востребованы в изучении специфики формирования стока КВС, формируют современные представления о происходящих в них процессах. Методы с использованием искусственных трассеров (чаще всего — флуоресцентных красителей) эффективны при определении фильтрационных свойств среды, скоростей транзита воды в КВС, уточнении границ водосборных площадей. Их способность выявлять взаимодействия между потоками в КВС ограничена из-за возможной сорбции красителей глинистыми материалами и органикой. Естественные стабильные изотопы δH^2 и δO^{18} наряду с другими геохимическими трассерами активно используются в исследованиях взаимо-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект 23-27-00236).

действия всех видов диффузного и концентрированного стока внутри КВС.

Примерами изучения подземного стока в карстованных бассейнах могут быть работы по трассированию эпикарстовых вод в пещерах [16, 22], а также по оценке компонентов стока КВС — Красс на границе Словении—Италии [18], пещеры Уинд в Южной Дакоте [21], подземной р. Лост Ривер штата Индиана [20].

Задача исследования — по данным гидролого-гидрохимического мониторинга 2021—2023 гг. на трех экспериментальных бассейнах, включающих крупные КВС Горного Крыма, и с использованием трассерной модели смешения, известной в научном сообществе как “end-member mixing analysis” (ЕММА), выявить стабильные источники питания стока КВС, оценить вклад каждого из них.

Интерпретация составляющих стока — главная методическая проблема исследования, поскольку единая генетическая классификации видов стока КВС отсутствует. Генезис источников питания, выявленных в ходе ЕММА-анализа, рассматривается как результат процессов геохимической трансформации водных потоков в пределах водосбора, в то время как большинство существующих классификаций строится на различных геофизических основаниях.

По характеру поступления атмосферных осадков выделяют три типа питания карстовых массивов [6, 7]: инфильтрационное — проникновение воды атмосферных осадков и склонового стока в почву и породу путем фильтрации; инфилюационное — проникновение в породу концентрированного стока из русел постоянных и временных водотоков через поноры и макротрещины; конденсационное — конденсация влаги из атмосферного воздуха в трещинно-канальных коллекторах.

В структуре карстового массива принято выделять основные составляющие стока по характеру движения влаги [9]: поровый (“matrix flow”), трещинный затрудненный (“vadose seepage”), трещинный эффективный (“vadose flow”), шахт-

ный или каналовой (“conduit flow”). Гидродинамическое зонирование выделяет в вертикальном профиле КВС следующие последовательные зоны [15]: эпикарстовую, занимающую верхнюю часть профиля открытого карста и отличающуюся высокой проницаемостью и пустотностью, в которой происходит задержка и трансформация инфильтрационных вод с дальнейшим преимущественно вертикальным дренажом; аэрации (или вадозную зону), где происходит преимущественно нисходящее движение в ненасыщенной среде к фреатической зоне; фреатическую — влагонасыщенную зону ниже уровня постоянного карстового водоносного горизонта, где преобладает латеральное движение влаги и зачастую возникают напорные условия. Геохимические фации вод, свойственные вышеуказанным зонам, должны находить отражение в общем стоке КВС.

Методика исследования изложена в ч. 1 статьи ([5]), ниже приведена расшифровка сокращений, используемых в тексте:

ЕММА — метод анализа геохимических данных, в котором сочетаются физическая модель смешения источников с использованием трассеров и статистическая процедура анализа многомерных данных, — метод главных компонент (МГК);

GK_j — главные компоненты, результат декомпозиции исходной матрицы геохимических данных методом МГК, они же интерпретируются как сложные модельные трассеры, каждая GK_j представляет собой линейные комбинации всех исходных гидрохимических показателей, используются в модели смешения путем замены химических трассеров;

U -пространство — подпространство, образованное взаимно-ортогональными осями — главными компонентами;

2D — размерность пространства смешения, определяемая МГК-моделью, в которой используются первые две GK_j ;

λ_j — оценка суммарной объясненной дисперсии GK_j .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ БАСЕЙНЫ

Водоток без названия, впадающий в р. Кучук-Узенбаш в 250 м ниже г/п Многогоречье, берет начало из постоянно действующего Карстового источника. Измерения выполнялись на гидропосту Крымгидромета, который располагается в ~50 м от источника ниже по течению, т. е. границы экспериментального бассейна и КВС источника Карстового практически совпадают. Для краткости далее будем обозначать этот объект бассейном КВС Карстовый. Водосбор занимает северные части плато Ялтинского массива с высотными отметками 1200–1350 м и его прилегающие склоны с балками Ханлы-Дере и Аллабуханы, ориентировочная площадь его составляет 11 км². Источник приурочен к зоне дробления тектонического нарушения, питание происходит за счет инфильтрации атмосферных вод через почву и эпикарст, а также путем инфлюации поверхностных водотоков в балках.

Река Кизилкобинка (Краснопещерная) представляет собой нижнюю, выходящую на поверхность часть “подземной реки” Красной пещеры, которая дренирует центральные участки Долгоруковского карстового массива. После выхода из пещеры река принимает притоки от родников Грифон, Алешина вода и более мелких. В свою очередь, КВС Красной пещеры сформирована частично за счет поглощения поверхностного водотока – р. Суботхан, протекающей в южной части плато Долгоруковского массива на высотах 900–1050 м. Суммарная площадь поверхностных и подземных частей экспериментального водосбора р. Кизилкобинки в створе измерений с абсолютной отметкой 460 м составляет 15.3 км². В дальнейшем будем называть этот объект бассейном КВС Красная пещера.

Горные породы верховьев водосбора представлены чередующимися полимиктовыми песчаниками и конгломератами и среднеслоистыми местами глинистыми известняками кимериджского яруса верхней юры, которые ближе к области поглощения стока р. Суботхан сменяются мергелями и глинистыми известняками. Подземная часть водосбора начинается у контакта с хорошо проницаемыми и растворимыми известняками нижнего титона. Здесь у пещеры Провал

и на расстоянии до 1 км к северу происходит поглощение речных вод, которые подземным путем направляются в сторону Красной пещеры [10].

Река Аян берет начало от одноименного, одного из крупнейших в Крыму карстового источника, расположенного в ущелье на северном склоне нижнего плато горно-карстового массива Чатырдаг. Экспериментальный бассейн складывается из КВС Аянского источника и водосбора участка водотока протяженностью ~1 км до контрольного створа измерений общей площадью 22.8 км². Далее объект обозначается как бассейн КВС Аян.

В геологическом отношении массив имеет цокольное строение. Его водоносная толща, сложенная верхнеюрскими известняками, поднята по отношению к окружающим по периферии слабопроницаемым породам таврической серии и мела и наклонена на северо-запад. Это исключает перетоки из соседних с массивом водосборов и определяет местное исключительно атмосферное питание. Большой перепад высот между областями питания и разгрузки, совпадение уклонов макросклона и слоев известняков с направлением подземного стока обеспечивают относительно высокую динамику карстовых вод. В условиях высокой канализованности потоков, экранированности известняков в основании северного склона водоупорными толщами нижне-меловых глин, как следствие – концентрации в виде единого фокуса разгрузки в наиболее ослабленной зоне крупного тектонического разлома, Аян приобретает черты воклюзского источника. Для него характерны напорная циркуляция вод, положение во фреатический (эпифреатической) гидродинамической зоне, формирование лабиринтовой системы водопроводящих каналов.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Наблюдения за стоком и гидрохимическим режимом выполнялись в трех замыкающих створах экспериментальных бассейнов (рис. 1). Массив данных включал измеренные расходы воды Q (м³/с) и результаты анализа проб воды по следующим показателям: водородный показатель рН, удельная электропроводность χ (мкСм/см), концентрации ионов (мг/л): Na⁺,

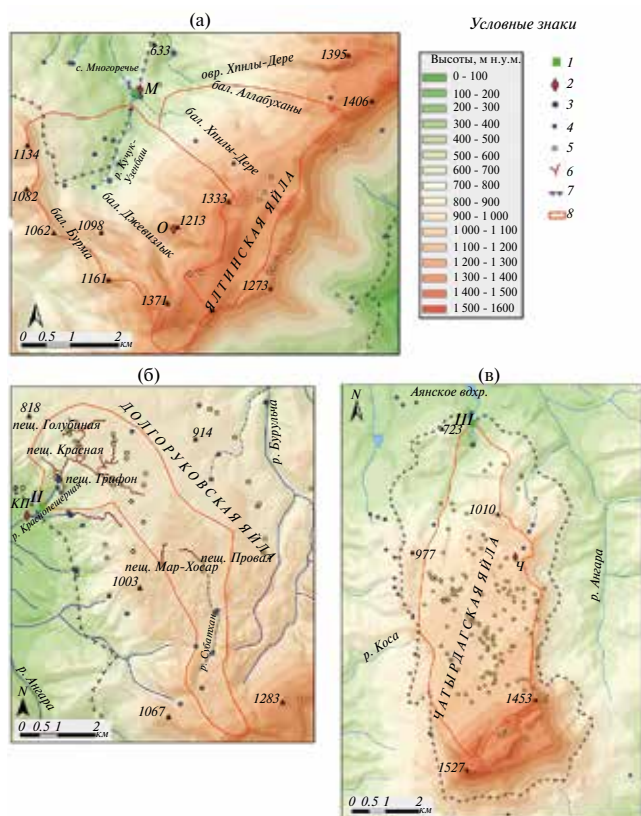


Рис. 1. Картограммы бассейнов КВС: а – Карстовый, б – Красная пещера, в – Аян. 1 – гидрологические створы (I – Карстовый приток – с. Много-речье, II – р. Кизилкобинка – контрольный створ; III – р. Аян – бетонный мостик); 2 – метеостанции (М – Многогоречье, О – Ольмесхыр, КП – Красно-пещерная, Ч – Чатырдаг); источники: 3 – крупные, 4 – мелкие; элементы рельефа: 5 – карстовые полости; 6 – ходы крупных карстовых пещер; границы: 7 – распространения верхнеюрских карбонатных пород, 8 – бассейнов.

K^+ , Ca^{2+} , HCO_3^- , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- ; содержание растворенного кремния Si (мг/л). Количество измерений по створам следующее: по бассейну КВС Карстовый – 31; бассейну КВС Красная пещера – 47; бассейну КВС Аян – 32. Атмосферные осадки и другие метеохарактеристики регистрировались автоматическими станциями в пунктах наблюдений: Многогоречье (509 м в.у.м.), Ольмесхыр (1190 м), Караби-Яйла (1006 м), Кизил-Коба (480 м) и Чатырдаг (1030 м).

В качестве потенциальных источников питания тестировались все опробованные водопроявления на водосборах: жидкие и твердые атмосферные осадки; воды эпикарстовых гори-

зонтов массивов, отбираемые на участках экспонирования карбонатных пород; воды других видов источников, многочисленные выходы которых рассредоточены во всем высотном диапазоне водосборов. В бассейне КВС Красная пещера отбирались воды “подземной реки” и капли со сводов пещеры, представляющие образцы эффективного трещинного стока карстового массива. К анализу привлекались также имеющиеся отдельные данные о химическом составе вод конденсационного происхождения из работ [6, 12].

Анализ химического состава различных типов вод экспериментальных бассейнов, в том числе КВС, приведен в [4]. Охарактеризуем их кратко, используя новые, не привлекаемые ранее к анализу массивы данных. Воды атмосферных осадков представлены единой выборкой для всех исследуемых бассейнов, описание химического состава которых приведено в [5].

Данные о химическом составе конденса- ционных вод карстовых массивов немногочисленны. Состав конденсата неустойчив, поскольку сразу начинает трансформироваться в ходе коррозионной деятельности и смешивания с другими типами карстовых вод [6]. Массив данных представлен отдельными осредненными характеристиками по 35 пробам из Воронцовской пещеры [12], залегающей в сходных с исследуемыми литологических условиях (в известняках верхнего мела и юры). Воды гидрокарбонатные кальциевые по составу, их минерализация меняется в диапазоне 140–260 мг/л (среднее 171 мг/л), среднее содержание Ca^{2+} – 38.5 мг/л.

Воды в гидрологических створах бассейнов КВС обладают сходным химическим составом, характеризуются как пресные, слабощелочные, гидрокарбонатные кальциевые (в случае ист. Карстового – гидрокарбонатные магниевые-кальциевые) с минерализацией в диапазоне 245–390 мг/л. Наименее минерализованные воды (среднее 290 мг/л) отмечены в створе р. Кизилкобинки, что обусловлено процессами туфообразования, активно протекающими выше створа и тесно связанными с действующим термобарическим барьером. В Карстовом притоке отмечается стабиль-

ность температурного фона — 8.1–8.8°C, что свидетельствует о разгрузке карстовых вод, находящихся в условиях гомотермии с вмещающими породами. Особенность вод ист. Аянского — повышенные концентрации NO_3^- (3.4–3.8 мг/л) во все фазы стока. Исчерпывающий анализ химического состава вод КВС, в том числе закономерности изменения концентраций трассеров с расходами воды, приведен в [4].

По сравнению с описанием в [4], использованы дополнительные данные. Подземные воды бассейна КВС Карстовый (29 проб) слабощелочные (pH 7.87), преимущественно гидрокарбонатные кальциевые, в отдельных случаях — гидрокарбонатные магниевые-кальциевые; минерализация меняется в диапазоне 250–450 мг/л; содержание Si — 1–2.7 мг/л. Также привлекались пробы воды, отобранные в смежных водосборах рек Кучук-Узенбаш (34 пробы) и Биюк-Узенбаш (4 пробы).

Подземные эпикарстовые воды верхней части бассейна (выше 900 м) КВС Красная пещера (25 проб) преимущественно нейтральные (pH 7.2–7.7), гидрокарбонатные кальциевые, с относительно повышенной минерализацией по сравнению с другими водами этого бассейна (328–488 мг/л), содержание Si — 1.5–4.7 (среднее 2.9 мг/л). Родники нижней части бассейна, являющиеся дериватами подземного потока Красной

пещеры и имеющие выходы до 600 м, представлены 21 пробой и характеризуются минерализацией, меняющейся в диапазоне 205–427 мг/л, слабощелочной реакцией (pH 7.4–8.2). Среднее содержание Si — 2.1 мг/л.

Воды капли (5 проб), отбираемые с трещиноватых сводов Красной пещеры в предсифонной галерее и в Академическом зале в течение в среднем ≤ 3 сут, — слабощелочные (pH 7.89–8.00), гидрокарбонатные кальциевые, минерализация изменяется в пределах 315–358 мг/л, концентрация Si — 1.1–2.0 мг/л.

Воды подземного участка реки в Красной пещере (9 проб) — слабощелочные (pH 7.56–8.01), гидрокарбонатные кальциевые, минерализация в пределах 262–386 мг/л, Si — 1.5–2.7 мг/л.

Из проявлений подземных вод в пределах бассейна КВС Аян отобраны 10 проб. Воды характеризуются слабощелочной реакцией (pH 7.5–8), гидрокарбонатные кальциевые, минерализация меняется от 176 до 320 мг/л. Среднее содержание Si — 1.3 мг/л. Воды родников бассейна р. Тавель (3 пробы) отличаются от проб Аянского бассейна нейтральной реакцией (pH 7.5), относительно высоким содержанием NO_3^- (5.4–9.6 мг/л) и минерализацией (409–508 мг/л), они гидрокарбонатные магниевые-кальциевые, среднее содержание Si — 2.7 мг/л.

Таблица 1. Характеристики МГК-моделей: ГК_j — главные компоненты разложений; λ_j , % — объясненные дисперсии по каждой ГК_j

Бассейн	ГК _j	λ_j	$\Sigma \lambda_j$	Коэффициенты перехода трассеров (P-матрица)			
				χ	Na^+	SO_4^{2-}	Si
КВС Карстовый	ГК ₁	67	67	-0.529	0.270	0.802	-0.076
	ГК ₂	18	85	-0.517	0.405	-0.528	-0.539
	ГК ₃	8.5	94	-0.551	-0.024	-0.281	0.785
	ГК ₄	6.5	100	-0.388	-0.874	0.011	-0.295
				χ	Ca^{2+}	Mg^{2+}	—
КВС Красная пещера	ГК ₁	57	57	0.337	0.843	0.420	
	ГК ₂	36	93	0.725	0.052	-0.686	
	ГК ₃	7	100	-0.600	0.536	-0.594	
				χ	NO_3^-	Si	—
КВС Аян	ГК ₁	61	61	-0.482	-0.833	0.273	
	ГК ₂	26	87	-0.650	0.131	-0.749	
	ГК ₃	13	100	-0.588	0.538	0.604	

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

МГК-модели, консервативность трассеров

Различные наборы гидрохимических показателей тестировались по их консервативности по каждому экспериментальному бассейну, лучшие варианты МГК-модели с наиболее высокими значениями λ_2 представлены в табл. 1.

Анализ графиков “остатки – измеренные значения” (рис. 2) показывает, что распределение остатков E для размерности пространства смешения 2D в большинстве случаев, при исключении отдельных “отскакивающих” точек, имеет случайный характер. Статистическая проверка указывает на случайность распределения остатков при уровнях значимости 0.05 и 0.01. С учетом малого объема используемых при моделировании выборок и возможных ошибок определения

концентрации растворенных элементов вопрос о консервативности трассеров должен быть тщательно изучен в процессе дальнейших исследований.

В качестве расчетной МГК-модели для бассейна КВС Карстовый был принят вариант, включающий набор из четырех трассеров с $\lambda_2 = 85\%$ (табл. 1). Для бассейнов КВС Красная пещера и Аян модели включают по три трассера с λ_2 МГК-модели – 90%.

Анализ диаграмм смешения и обоснование источников питания

С использованием матрицы коэффициентов перехода (табл. 1) по каждому бассейну были построены диаграммы смешения в U -пространстве, на которых измеренные концентрации трассеров проб речных вод образуют поля сме-

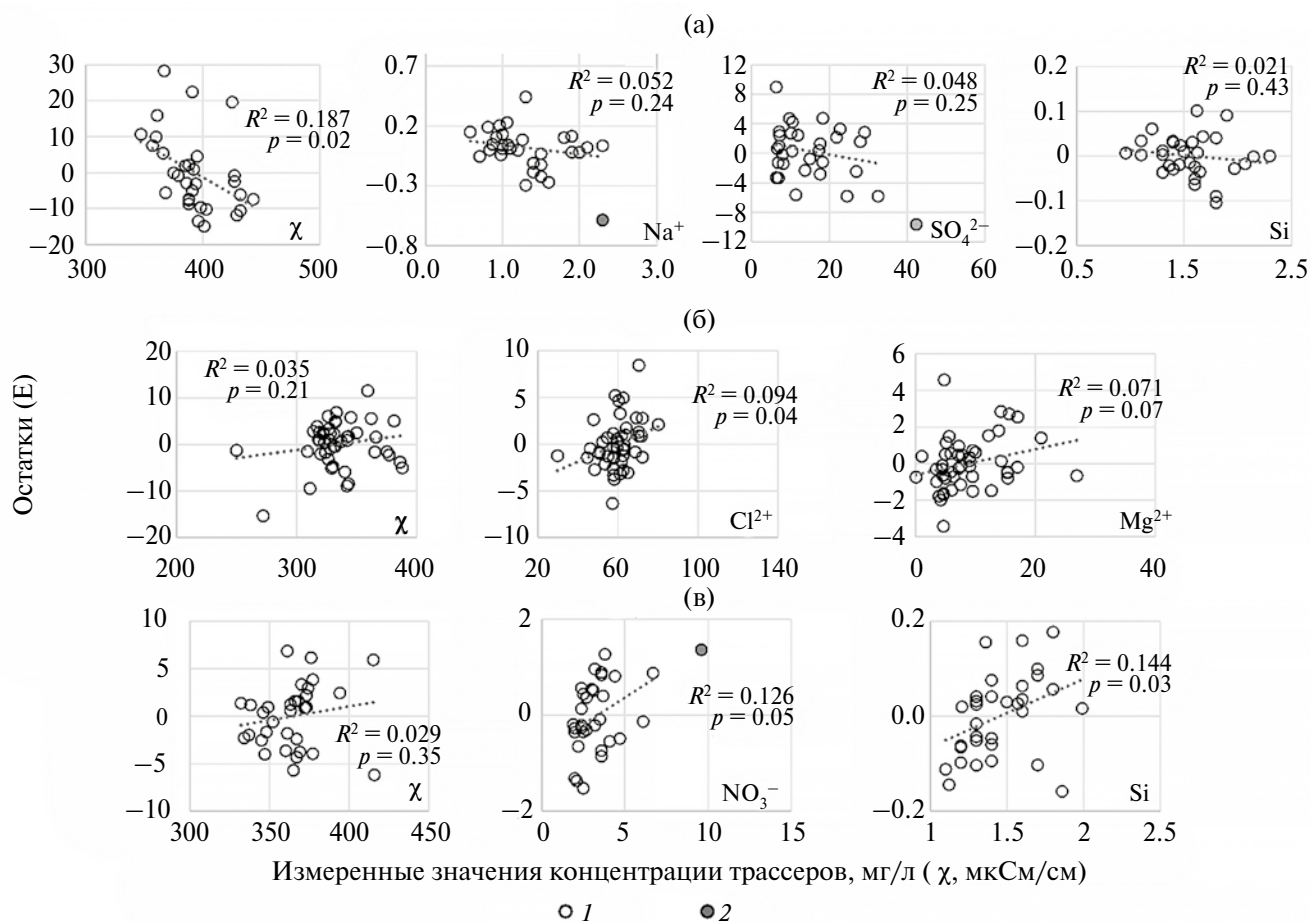


Рис. 2. Графики связи “остатки E – измеренные значения концентрации трассеров” в бассейнах: а – КВС Карстовый, б – КВС Красная пещера, в – КВС Аян. 1 – речные пробы, 2 – “отклоняющиеся значения”, p – вероятность отсутствия корреляционных связей на графиках.

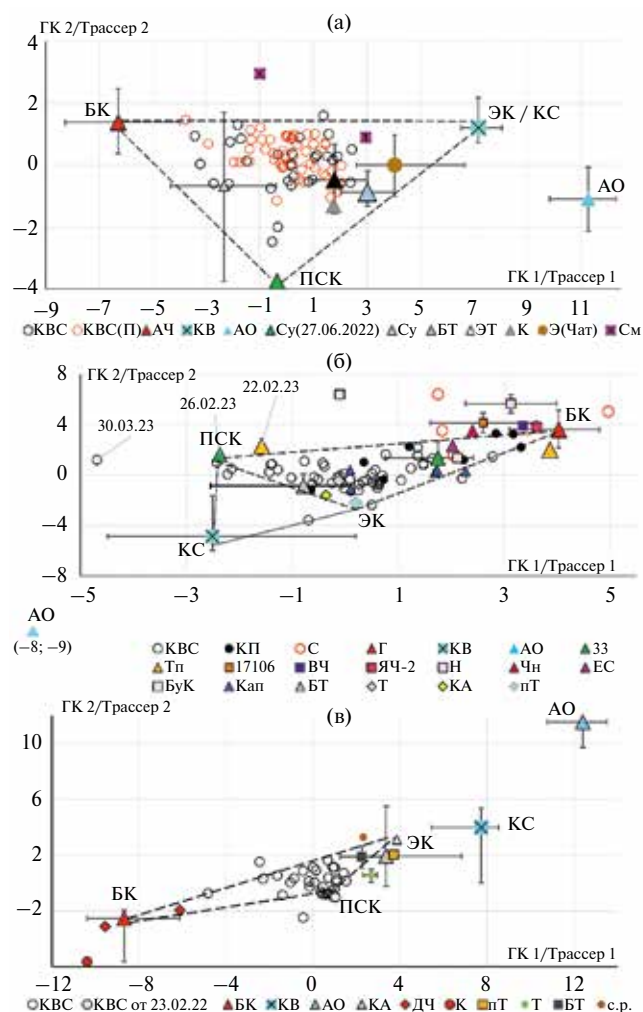


Рис. 3. Диаграммы смешения вод в U -пространстве бассейнов КВС: а – Карстовый, б – Красная пещера, в – Аян. Источники питания: АО, КС, ЭК, БК, ПСК (расшифровка в тексте). Пробы: КВС – исследуемых створов, КВС(П) – проверочной выборки, КП – подземной реки в Красной пещере, С – р. Суботхан; родников: АЧ – Азменын Чокрак, БТ – Беш-Текне, ЭТ – Эки-Текне, СМ – Биюк-Узенбаш, Г – Грифон, Тп – Туфовая площадка, 33 – источник № 33, 17106 – родник, ВЧ – Вейрат-Чокрак, ЯЧ-2 – Ярма-Чокрак-2, Н – Надежда, Чн – Челбаш нижний, ЕС – Ени-Сала, БуК – Буковый кордон, ДЧ – Дамчи-Чокрак, Кр – Криничка, КА – Курт-Аир, Т – Точка, пТ – родник в пещере Точка, Э (Чат) – эпикарстовых родников с плато Чатырдаг; других водоправлений: Су – в балке Сухой, К – колодец, Кап – капель в пещ. Красная, с.р. – склоновый ручей.

шения (рис. 3). В эти же U -пространства проецировались концентрации трассеров, осредненные по выборкам проб потенциальных источников питания (рис. 3). Для бассейна КВС Карстовый дополнительно на диаграмму смешения прое-

цировались концентрации проб воды независимой выборки суточного разрешения (рис. 3а). На диаграммах смешения определяются источники питания – водные массы, формирующие общий сток. Они занимают крайние положения и ограничивают треугольные поля смешения вод каждого бассейна таким образом, чтобы все пробы речных вод заключались внутри.

Источники питания не всегда представляют “чистую” гидрохимическую фацию вод, которую можно интерпретировать однозначно, поскольку они не изолированы друг от друга, а процессы химической трансформации (разбавление, растворение, осаждение, сорбция и др.) протекают в каждом отделе рассматриваемой системы. Используемая модель смешения позволяет распознавать только три источника питания, некоторые из них сами могут быть результатом смешения различных типов водных масс. Лишь дальнейшая детализация исследований и совершенствование методического аппарата могут позволить уточнить их состав. Поэтому при интерпретации источников питания редко удается строго придерживаться терминологии устоявшихся классификаций природных вод. В рамках данного анализа использованы “рабочие” термины для источников питания, содержание которых требует пояснений.

Воды **атмосферных осадков** (АО) – наиболее четко и однозначно выделяемый потенциальный источник питания. Химический состав этих вод наиболее изучен, а низкая минерализация по сравнению с водами бассейнов, с точки зрения применяемой модели, делает нецелесообразным разделение проб жидких и твердых осадков, а также учет пространственных вариаций химического состава АО. Можно сказать, что воды АО как источник питания отличаются наибольшей устойчивостью и репрезентативностью состава, обладают высокой агрессивностью при инфильтрации [10] – именно в эпикарстовой зоне, в условиях легкой доступности CO_2 из почвы и растительности, реализуется большая часть потенциала АО к растворению карбонатных пород.

Эпикарстовый источник питания (ЭК) представляет водную массу, формирующуюся в эпикарстовой гидродинамической зоне КВС и четко

распознаваемую как особая гидрохимическая фация. Эпикарстовые воды образуют подвешенный горизонт динамических влагозапасов, они — своеобразный аналог верховодки, характерной для незакарстованных территорий. Пополнение эпикарстовой зоны происходит преимущественно в результате инфильтрации вод АО, поэтому эпикарстовый сток содержательно коррелирует с инфильтрационным питанием КВС.

Конденсационное питание (КС) формируется в трещинно-карстовых коллекторах при благоприятных условиях, возникающих в Горном Крыму в теплый период [1]. КС играет определенную роль в стоке рек и обнаруживается при анализе гидрографов меженных внутрисуточных колебаний расходов [10], однако условия для его выявления как устойчивой гидрохимической фации вод отсутствуют. Большинство исследований указывает на “особую агрессивность конденсационных вод к горной породе в момент их образования” [6], т. е. скорость трансформации химического состава КС за счет взаимодействия с породой и другими типами вод должна быть даже выше, чем у АО. Отбор проб конденсата очень затруднителен, а имеющиеся немногочисленные данные о его химическом составе свидетельствуют о его схожести с эпикарстовыми водами. В рамках применяемой модели смешения следует рассматривать КС как вариант, или фракцию, источника питания ЭК.

Поверхностно-склоновый источник питания (ПСК) понимается аналогично водам одной из генетических категорий по классификации П.П. Воронкова [2] с таким же названием — как результат стекания атмосферных осадков по поверхности склонов, когда почвенный слой находится в состоянии насыщения. К этой категории относится и сток, изредка возникающий за счет превышения интенсивности осадков над интенсивностью инфильтрации в почву, так называемый “хортоновский” сток. В англоязычной литературе для этих механизмов формирования стока употребляются термины соответственно “saturation excess overland flow” и “infiltration excess overland flow” [17].

При специфической выположенности закарстованных участков водосборов (яйл) в периоды

интенсивного увлажнения создаются особые гидродинамические условия, формирующие зону поверхностной (горизонтальной) циркуляции избыточного влагозапаса [11]. Его дренаж происходит преимущественно путем инфильтрации и инфлюации через карстовые понижения (карстовые поля, воронки, поноры, карстовые шахты и др.). Одновременно на поверхности карстующихся пород может возникнуть подзона временных висячих водотоков на местных водоупорах, которые большей частью перехватываются крупными понорами, переводящими сосредоточенные поверхностные потоки сразу в глубокие горизонты карстового массива. Таким образом, в период интенсивного увлажнения происходят как обычное питание эпикарстовой и нижележащих зон, так и быстрый дренаж и транспорт избыточной влаги к месту разгрузки, выражающийся в интенсивных “пиковых” подъемах расходов в контрольных створах. Предполагается, что инфлюация преобладает при загрузке тало-дождевых вод в бассейн, поэтому ПСК можно сопоставить с инфлюационным типом питания по [7, 8].

Под **базисным карстовым источником (БК)** будем понимать совокупность подземных вод бассейна, питающих базисную часть гидрографа стока. Термин подчеркивает определяющую для бассейнов КВС роль глубинных зон карстовых массивов. Очевидно, что БК включает трещинно-жильные воды зоны вертикальной нисходящей циркуляции, а также насыщенной зоны горизонтальной и напорной циркуляции в различных пропорциях. Детализация состава БК пока невозможна как из-за ограничений методики исследований, так и из-за недостаточности накопленных данных.

Диаграммы смешения построены для всех трех исследуемых объектов (рис. 3). В **бассейне КВС Карстовый** источника питания БК на диаграмме (рис. 3а) представлен точкой, соответствующей осредненным концентрациям проб вод из родников Правого и Левого Азменын-Чокрак. Осреднение выполнено по 14 пробам, отобраным преимущественно в холодное время года. Их состав отличается от состава других проб из этих родников по признакам, указывающим на наименьшее влияние смешивания родниковых

вод с более теплыми склоновыми водами. Это подтверждается как концентрациями трассеров, так и температурой воды, а также анализом погодных условий.

Другой источник питания представлен единственной пробой из балки Ханлы-Дере, отобранной во время экстремального паводка 27.06.2022. Натурными обследованиями во время паводков в бассейне КВС Карстовый подтверждено функционирование макропор, склоновых дрен, временных родников. В смеси с временными поверхностными водотоками они образуют поверхностное склоновое стекание. Локализация отбора пробы и анализ гидрологической ситуации позволяют интерпретировать этот источник питания как ПСК.

Третий источник питания не представлен пробами, отобранными в ходе съемок. Проецируя осредненные концентрации конденсационных вод из Воронцовской пещеры, получаем краевую позицию источника питания КС в поле смешения бассейна КВС Карстовый (рис. 3а). Осредненные концентрации вод из род. Беш-Текне, который представляет источник питания ЭК для водосбора р. Кучук-Узенбаш, дают на диаграмме точку внутри поля смешения (рис. 3а) вблизи прямой, соединяющей источники КС и ПСК, т. е. воды Беш-Текне могут рассматриваться как результат смешения этих источников.

Учитывая сказанное выше, предполагаем, что истинное положение источника ЭК на диаграмме не установлено, но положение источника КС может рассматриваться как приемлемое приближение. Данные по источнику КС используются в расчетах в модели смешения, но результаты интерпретируются как доли источника питания ЭК. Это требует подтверждения пробами, репрезентативными к эпикарстовым водам этого бассейна, поиск которых следует продолжить на более удаленных и возвышенных участках Ялтинской яйлы. Косвенным подтверждением принятой интерпретации служат осредненные концентрации проб эпикарстовых вод с Чатырдагского плато, проекция которых на диаграмму смешения (рис. 3а) располагается максимально близко к источнику КС.

На диаграмме смешения вод в бассейне **КВС Красная пещера** (рис. 3б) выделяются три источника питания – ПСК, БК и ЭК. Генезис источника питания ПСК обоснован анализом гидрологических условий отбора проб, “отскакивающих” на диаграмме смешения (рис. 3б), которые были отобраны в контрольном створе р. Кизилкобинки в периоды повышенной водности (конец февраля – март в 2022 и 2023 гг.). В эти моменты в бассейне отмечались одновременно активное таяние снега и выпадение дождей. Отдельные пробы из родников Туфовая площадка и ист. № 33, отобранные 22.02.2023 и 26.02.2023, отклоняются на диаграмме (рис. 3б) от проб межленного периода этих же родников. Предположительно, эти родники, представляющие собой дериваты “подземной реки” Красной пещеры, в упомянутые даты разгружали избыточный тало-дождевой сток с переувлажненного бассейна.

Источник питания БК обоснован пробами из родников Грифон и Челбаш нижний, разгружающихся на значительно более низких гипсографических уровнях, чем источник Красной пещеры. Эти пробы занимают краевое положение на диаграмме (рис. 3б) и обладают заметной вариацией концентраций трассеров. Для расчетов по модели смешения использованы осредненные концентрации проб родника Грифон, поскольку при этом треугольник смешения максимально охватывает пробы речных вод.

Родники Надежда, ист. 17106, Ярмачок-2, Вейрат-Чокрак, Буковый кордон, расположенные в бассейне р. Суботхан, по гипсографическому положению и геоморфологической обстановке относятся к эпикарстовым. Однако на диаграмме смешения (рис. 3б) их пробы находятся вблизи проб родников Грифон и Челбаш нижний, характеризующих источник питания БК, что вызывает затруднение в интерпретации общей картины и требует дальнейшего исследования. Расположение на диаграмме проб воды из суббассейна р. Суботхан (речных и родниковых) в целом вне области смешения вод бассейна КВС Красная пещера позволяет предположить существенно иную геохимическую обстановку на этом участке Долгоруковской яйлы.

Перечисленные эпикарстовые источники обладают повышенной минерализацией (380–540 мг/л), причина этого, по-видимому, — режим замедленного водообмена в эпикарстовом водоносном горизонте, формирующийся при развитии локальных водоупоров из-за высокого содержания глинистых фракций в подстилающих породах на Долгоруковской яйле. При этом весь сток, дренируемый р. Суботхан в ее суббассейне, поглощается в районе пещеры Провал и попадает в глубокие горизонты карстового массива, где смешивается с водами, близкими по минерализации. Выявить этот тип водной массы применяемым методом расчленения гидрографа в замыкающем створе, очевидно, невозможно.

Третий источник питания — ЭК — недостаточно подтвержден эмпирическим материалом, но его предполагаемая позиция на диаграмме смешения (рис. 3б) хорошо позиционируется по пробам речных вод. Проецирование проб эпикарстовых вод, отобранных на Ялтинской яйле (род. Беш-Текне), и родников на Чатырдагской яйле (Курт-Аир, Точка, родник в пещере Точка), отчетливо маркирует границы возможных положений вершины ЭК. Группировка части проб р. Кизилкобинки в вершине ЭК (рис. 3б) подтверждает, что воды эпикарстового горизонта с интенсивным водообменом в бассейне КВС Красная пещера существуют, и в дальнейшем необходим отбор репрезентативных проб. Предположительно, такие воды концентрируются в водотоках пещер Змеиной и Слияние на глубине 10–20 м от поверхности, которые дренируются в Красную пещеру.

Источник питания КС, нанесенный на эту же диаграмму (рис. 3б), лежит на линии АО–ЭК, что соответствует общим представлениям о закономерности трансформации химического состава водных масс в бассейне. Его положение также — косвенное подтверждение выбранной локализации источника ЭК.

При малом числе отобранных проб в **бассейне КВС Аян** его поле смешения на диаграмме (рис. 3в) выглядит вполне отчетливо, хотя положение источников питания БК и ПСК характеризуется значительной неопределенностью. Пробы эпикарстовых вод из родников Курт-Аир

и в пещере Точка — репрезентативные представители источника питания ЭК. Близкое расположение точки осредненных концентраций проб из родника Беш-Текне Ялтинской яйлы подтверждает положение этого источника питания на диаграмме смешения. Источник питания КС располагается близко к источнику питания ЭК (рис. 3в), находится на трансформационной траектории АО–ЭК, границы вариаций расположения проб конденсационного происхождения перекрываются аналогичными границами проб эпикарстовых родников.

Источник питания БК представлен на диаграмме смешения (рис. 3в) осредненными концентрациями проб родников Домчи-Чокрак и Криничка из соседнего бассейна р. Тавель, заложённых в полимиктовых конгломератах с высокой долей кварца. В поле диаграммы пробы из р. Аян с расходами ≤ 100 л/с закономерно тяготеют к источнику питания БК. При этом, однако, ближайшей к БК оказывается проба, отобранная во время экстремального летнего паводка 27.06.2022 при измеренном расходе 14 м³/с. Вероятно, химический состав паводковой водной массы сформирован именно глубинными карстовыми водами в ситуации возникновения поршневого эффекта (“piston effect”). Поршневой эффект заключается в выдавливании вод из каналов фреатической зоны в результате мгновенного поднятия уровня грунтовых вод, вызванного импульсом давления при достижении полного насыщения в вадозной зоне [19].

Третий источник питания представлен одной из проб Аянского источника, отобранного 23.02.2022, и не имеет подтверждения пробами из родников (рис. 3в). Его положение на диаграмме смешения характеризуется высокой долей неопределенности, однако интерпретация достаточно очевидна. Как и в бассейне КВС Красная пещера, это водная масса, сформированная водами от таяния снега и наложившимися дождями, которая определена выше как источник питания ПСК.

Модель смешения вод для бассейна КВС Аян следует рассматривать как предварительную, с высокой степенью неопределенности и недостаточно подтвержденную эмпирическим материа-

Таблица 2. Осредненные концентрации трассеров в источниках питания

Источник питания / Трассер, мг/л (χ , мкСм/см)	Бассейн КВС												
	Карстовый					Красная пещера				Аян			
	Σi^*	χ	Na^+	SO_4^{2-}	Si	Σi	χ	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Σi	χ	NO_3^-	Si
Атмосферные осадки	24	18.7	0.57	0.01	0.2	24	18.7	1.85	1.0	24	18.7	1.33	0.2
Конденсационный [14]	171	212	—	—	—	171	214	38.5	—	171	202	—	—
Эпикарстовый	277	313	0.8	5.5	1.4	272	315	57.9	4.1	270	301	2.2	1.0
Поверхностно-склоновый	349	388	0.7	11.1	2.7	292	349	45.3	21.1	342	372	1.9	1.2
Базисный карстовый	434	488	3.3	42.2	2.0	398	447	86.5	6.00	464	528	6.7	2.8

* Σi — сумма ионов, мг/л.

лом, т. е. требующей дополнительной проверки. Тем не менее важно отметить, что генезис водных масс выявленных источников питания совпадает с генезисом аналогичных источников питания в бассейне КВС Красная пещера, хотя при этом наборы используемых трассеров различны.

В табл. 2 приведены концентрации трассеров в источниках питания.

Оценки составляющих стока, валидация модели

Расчет долей/расходов источников выполнен по уравнениям (2)–(4) из [5], а результаты расчета на каждую дату измерения расхода воды представлены в графическом виде (рис. 4).

Для Карстового источника валидация модели смешения выполнена в двух вариантах: для тестируемой и проверочной выборки, в других бассейнах — по единственной тестируемой выборке. Сравнение модельных и измеренных концентраций трассеров приведено на рис. 5.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведенные хемографы измеренных и модельных трассеров (рис. 5), а также высокие значения коэффициентов корреляции связей их концентраций позволяют считать предлагаемые модели смешения эффективным инструментом в задаче оценки источников питания и при детальном изучении механизмов процессов формирования стока. Малое число обоснованных трассеров в МГК-моделях для бассейнов КВС Красная пещера и Аян свидетельствуют о более сложном процессе формирования стока и необходимости учета дополнительных источников, т. е. повышения ранга модели смешения. Это требует привле-

чения в разы больших объемов данных, а также поиска наиболее информативных трассеров для разделения смешанных видов стока.

Доверие к полученным моделям ограничивается степенью неопределенности положения источников питания (вершин поля смешения) на диаграммах. Эта задача прямо связана с репрезентативностью отбираемых образцов проб воды по отношению к источникам питания, а также с оцениванием пространственной и временной изменчивости их химического состава и последующим ее учетом в модели смешения. Сравнение концентраций некоторых трассеров, используемых в моделях смешения, показывает, что эпикарстовые воды исследуемых КВС обнаруживают сходство химического состава (табл. 2), что указывает на его пространственную устойчивость и возможность использования фоновых концентраций ЭК в региональных исследованиях.

Базисный карстовый сток характеризуется индивидуальным химическим составом для каждого бассейна и определяется преимущественно литологическим составом пород, слагающих водоупорные основания, и временем контакта “вода–порода”. Общее свойство химического состава источников питания БК всех рассматриваемых бассейнов — наиболее высокие значения минерализации.

Результаты моделирования на основе трехкомпонентной модели смешения позволяют обнаружить некоторые особенности гидрологического режима КВС. В бассейне КВС Красная пещера определяются участки водосбора с замедленным водообменом в зоне эпикарста. Преимущественно они распространены в суббассейне

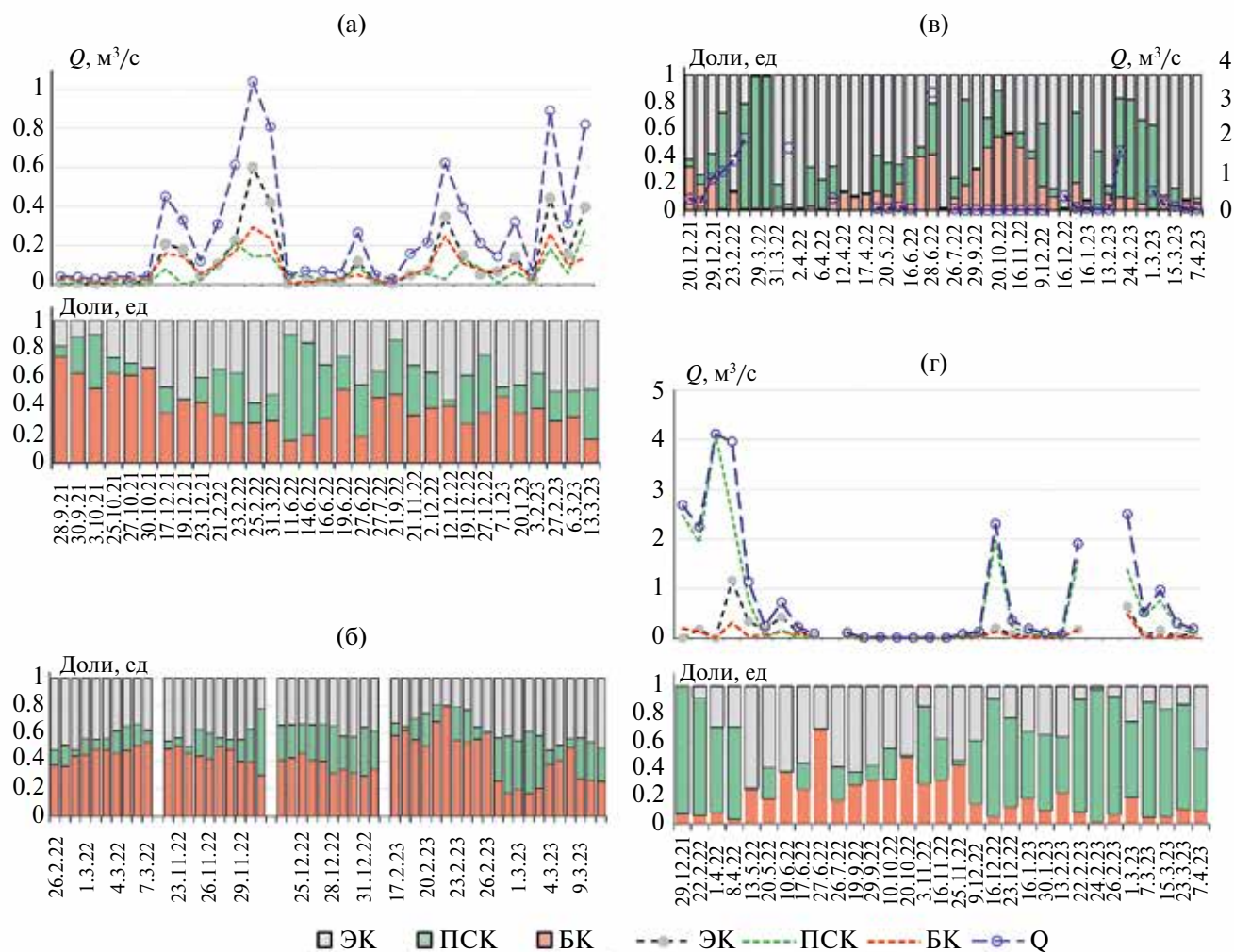


Рис. 4. Разделение стока КВС по источникам питания на даты съемки. Бассейны КВС: а – Карстовый, б – Карстовый (проверочная выборка), в – Красная пещера, г – Аян. Расшифровка источников питания приведена в тексте.

р. Суботхан. Очевидно, что эпикарстовые воды, отобранные здесь, не имеют прямой разгрузки в р. Кизилкобинку, а питают нижележащие водоносные горизонты.

Интересный факт – упомянутое выше проявление поршневого эффекта (“piston flow”) – специфического механизма стока в период экстремального паводка в бассейне Аянского источника. В бассейне КВС Красная пещера проявление поршневого эффекта менее заметно, но также обнаруживается при анализе диаграммы смешения (рис. 3б) на дату экстремального паводка 27.06.2022. Проба воды р. Кизилкобинки, отобранная при измеренном расходе $\sim 25 \text{ м}^3/\text{с}$ в замыкающем створе, группируется с пробами воды, отобранными в период низкого стока.

Подтверждается сходство химического состава эпикарстовых и конденсационных вод, что выражается в тесном соседстве источников питания ЭК и КС на всех диаграммах смешения (рис. 3). Оценка конденсационного типа питания на базе трехкомпонентной модели с суточным шагом и полным годовым циклом моделирования представляется невозможной. Для решения этой задачи период моделирования должен ограничиваться маловодным летне-осенним сезоном, а расчетный шаг должен позволять улавливать внутрисуточные колебания источников питания. Отбор проб должен выполняться при длительном отсутствии осадков на водосборе, корректном учете микроклиматических условий и выборе точки пробоотбора, где отсутствует неконтролируемое влияние на химический состав вод.

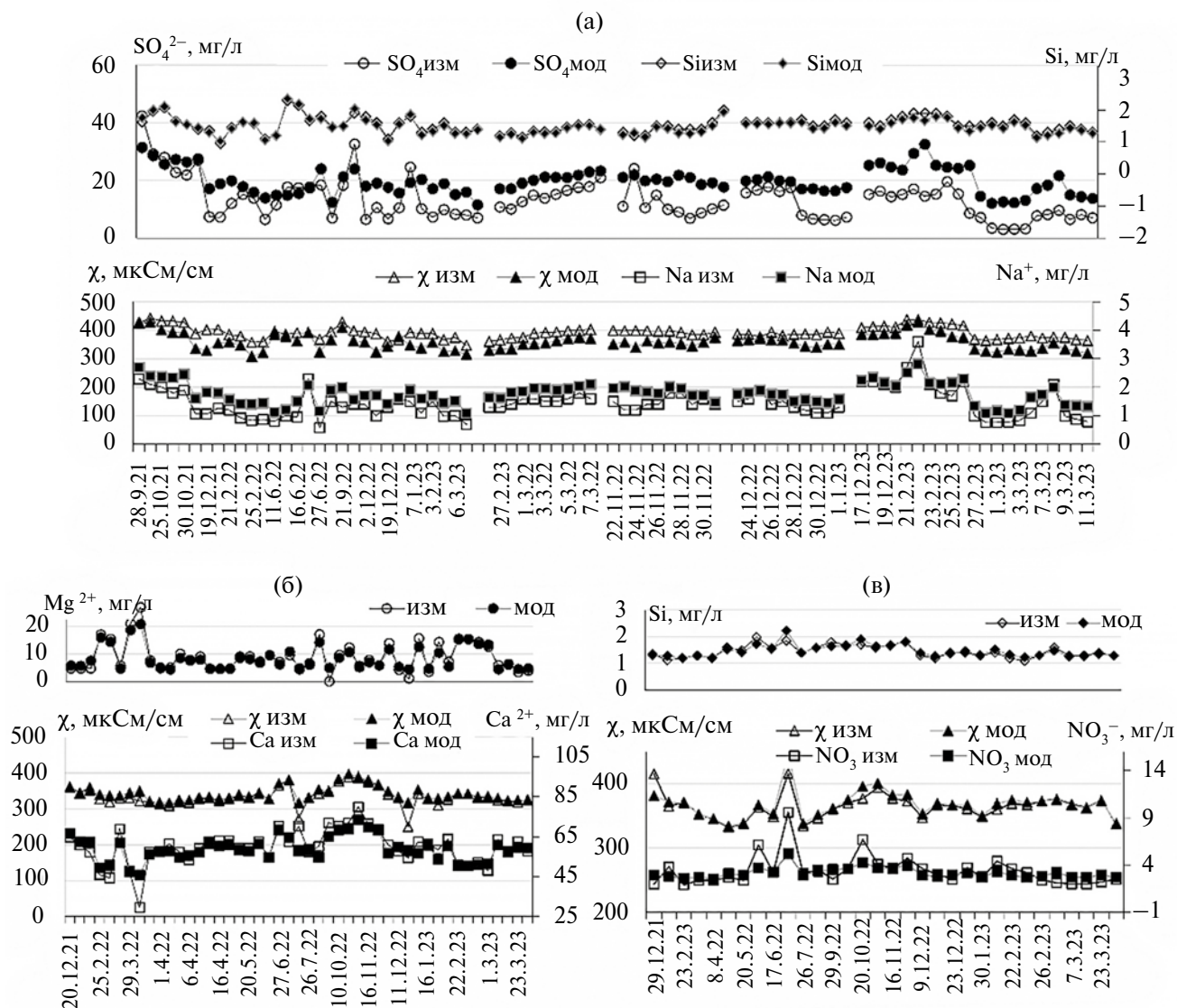


Рис. 5. Измеренные и модельные концентрации трассеров в моделях смешения бассейнов КВС: а – Карстовый: калибровочная выборка – 28.08.2021–6.03.2023, проверочная выборка 27.02.2022–11.03.2023; б – Красная пещера; в – Аян.

Выявлены различия в механизме формирования поверхностно-склонового стока. В бассейне КВС Карстовый большинство проб на диаграмме (рис. 3а), тяготеющие к источнику питания ПСК, характеризуются незначительными подъемами расходов воды, вызванными выпадением кратковременных локальных осадков (по данным метеостанций Ольмесхыр и Многоречье). Суточные суммы осадков варьируют в диапазоне 5–22 мм, а максимальные интенсивности – 6–64 мм/мин. При общей сухости бассейна на даты отбора проб наличие этой составляющей стока указывает на проявления “хортоновского” механизма стокоформирования, что требует дальнейшего исследования.

В бассейнах КВС Красная пещера и Аян источник питания ПСК представлен смесью тало-дождевых вод, подверженных поверхностной циркуляции, а впоследствии загруженной в карстовый массив в ходе инфлюации и очаговой инфильтрации. Эта составляющая стока может быть соотнесена с инфлюационным типом питания [7]. В работе [10] приведены сведения об условиях возникновения инфлюационного питания. При выпадении экстремальных осадков, когда суточные максимумы сопоставимы с месячной нормой или превышают ее, “во всех карстово-эрозионных и эрозионно-карстовых формах рельефа на плато и на склонах возника-

ет поверхностный сток”. Инфлюационное питание чаще возникает в холодный период при внезапном снеготаянии и наложении на него дождевых осадков. В паводок поглощение стока р. Суботхан у пещеры Провал может составлять до $3 \text{ м}^3/\text{с}$.

Связь долей источников питания с расходами

Анализ зависимостей долей источников питания от Q в замыкающих створах (рис. 6) показывает, что на всех водосборах доли источника питания БК снижаются с увеличением расходов, причем в бассейне КВС Красная пещера (рис. 6б) зависимость прослеживается только в диапазоне низких (до 80 л/с) Q .

Доли источника питания ЭК в бассейнах КВС Красная пещера (в диапазоне Q 80–3000 л/с) и ист. Аян (при $Q < 4000 \text{ л/с}$) проявляют тенденцию снижения с увеличением водности (рис. 6б, 6в). Напротив, доли источника питания ПСК (тало-дождевого) растут с увеличением расходов. Эти тенденции нарушают отдельные пробы, приходящиеся на некоторые даты в зимне-весенний период, которые образуют самостоятельные зависимости ЭК* и ПСК* (рис. 6б, 6в). Анализ условий измерений в эти даты (на р. Кизилкобинке: 23.12.2023, 29.12.2022, 23.02.2022, 1.04.2022; на Аяне: 1.03.2023, 1.04.2022, 13.05.2022, 20.05.2022) показал, что нарушение связей происходит на ветви спада уровней на фоне высокой водности КВС. Для бассейна КВС Красная пещера в эти

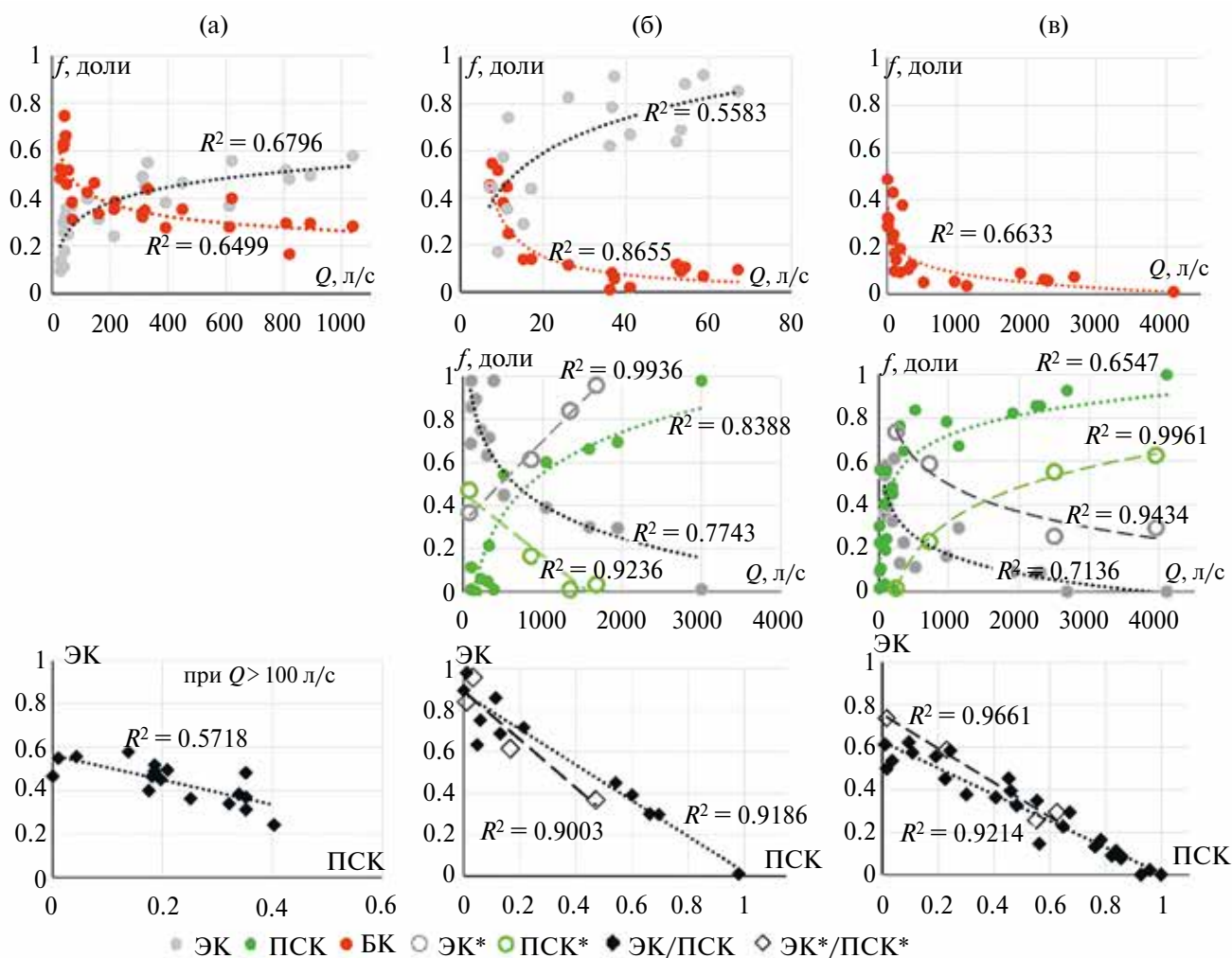


Рис. 6. Зависимости долей источников питания стока от расходов воды Q в замыкающих створах и соотношения долей ЭК/ПСК и ЭК*/ПСК* в бассейнах КВС: а – Карстовый, б – Красная пещера, в – Аян.

даты происходит изменение направления зависимостей ЭК и ПСК – с ростом расходов доли эпикарстовых вод в указанные даты начинают расти, а доли поверхностно-склоновых вод снижаются (рис. 6б). Для бассейна КВС ист. Аянского направление зависимостей ЭК* и ПСК* не меняется (рис. 6в), а происходит их сдвиг по отношению к ЭК и ПСК – доли эпикарстовых вод увеличиваются на 30–40%, а доли поверхностно-склоновых вод снижаются на 30–50% (рис. 6в). Во всех бассейнах отмечены тесные обратные соотношения между долями источников питания ЭК и ПСК. Подчеркнем, что описанная здесь динамика составляющих стока КВС существенно отличается от таковой для речных бассейнов.

Сравнительный анализ составляющих стока

При интерпретации перечисленных источников сохраняется субъективизм в суждении о генезисе той или иной водной массы, а также есть проблема пространственной и временной изменчивости химического состава источников питания. Относительная редкость и нерегулярность данных о составляющих стока не позволяют на данном этапе исследований выполнить полную оценку их динамики. Тем не менее сравнение осредненных долей стока источников питания по всем модельным водосборам вполне оправдано, так как периоды наблюдений и расчетов в целом совпадают. Это позволяет оценить порядок величин их долей (табл. 3) и уловить общие черты формирования стока КВС.

Доли источника питания ЭК >30% в общем стоке свидетельствуют о значимой его роли как для бассейнов КВС, так и для речных бассейнов. Источник питания БК составляет 30–45% и также является существенным компонентом стока в речных бассейнах и в бассейне КВС Карстовый.

Средние оценки долей компонентов стока в бассейнах КВС Красная пещера и КВС Аян выглядят несколько противоречиво и требуют дальнейшего уточнения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе продемонстрирована эффективность применяемого методического аппарата при исследовании гидрологии карстовых водоносных систем на примере трех модельных экспериментальных бассейнов. Выполнена адаптация трехкомпонентной двухтрассерной модели смешения для каждого модельного бассейна и проведено расчленение гидрографов стока исследуемых бассейнов КВС на составляющие, что позволяет исследовать структуру стока.

Для бассейнов КВС установлены следующие стабильные источники питания: эпикарстовый сток, формирующийся преимущественно в приповерхностной трещиноватой и выветрелой зоне карстующихся пород; поверхностно-склоновый сток, различающийся по механизму формирования; базисный карстовый сток, включающий смесь подземных вод зон аэрации карстовых массивов ниже эпикарста и фреатической.

Результаты оценки показывают существенную (>30%) долю питания эпикарстовыми водами во всех исследуемых бассейнах, что согласуется с современными представлениями в области карстологии. Для составляющих стока выявлены тесные зависимости их долей от расходов воды в замыкающих створах.

Перспектива дальнейших исследований связана с оценкой устойчивости модели, подтверждением обнаруженных зависимостей и исследова-

Таблица 3. Осредненные значения долей источников питания в стоке бассейнов КВС и речных бассейнов

Источник питания	Доля стока в бассейнах КВС, %			Доля стока в речных бассейнах, %	
	Карстовый	Красная пещера	Аян	Кучук-Узенбаш	Тонас
Эпикарстовый	38	59	32	35	43
Базисный карстовый*	34	15	19	45	31
Поверхностно-склоновый**	28	26	49	20	26

* Для речных водосборов – базисный источник.

** Почвенно-поверхностный (почвенно-делювиальный) сток в речных водосборах.

дованием режимов формирования отдельных видов стока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вахрушев Б.А., Вахрушев И.Б.* Роль карстовых конденсационных вод в водном хозяйстве античных и средневековых поселений Керченского полуострова // *Культура народов Причерноморья*. 1999. № 10. С. 7–10.
2. *Воронков П.П.* Закономерности процесса формирования и зональность химического состава вод местного стока // *Тр. ГГИ*. Л.: Гидрометеоздат, 1963. Вып. 102. С. 43–119.
3. *Газда С.* Источники загрязнения и охрана карстовых вод Западных Карпат // *Тр. Международ. симпоз. по гидрологии карста*. Будапешт, 1978. Т. 2. С. 141–155.
4. *Губарева Т.С., Амеличев Г.Н., Гарицман Б.И., Токарев С.В., Хрусталева Л.И., Морейдо В.М.* Ионный состав генетических типов природных вод речных бассейнов Горного Крыма // *Вод. ресурсы*. 2024. В печати.
5. *Губарева Т.С., Амеличев Г.Н., Гарицман Б.И., Токарев С.В., Вахрушев Б.А., Наumenко В.Г., Амеличев Е.Г., Вахрушев И.Б.* Оценка составляющих речного стока Горного Крыма. 1. Сток малых рек // *Вод. ресурсы*. В печати.
6. *Дублянский В.Н.* Карстовые пещеры и шахты Горного Крыма. Л.: Наука, 1977. 182 с.
7. *Дублянский В.Н., Дублянский Ю.В.* Проблема конденсации в карстоведении и в спелеологии // *Пещеры*. 2001. Вып. 27–28. С. 51–72.
8. *Дублянский В.Н., Кикнадзе Т.З.* Гидрогеология карста Альпийской складчатой области юга СССР. М.: Наука, 1984. 128 с.
9. *Климчук А.Б.* Эпикарст: гидрогеология, морфогенез и эволюция. Симферополь: Изд-во Сонат, 2009. 111 с.
10. Красная пещера. Опыт комплексных карстологических исследований / Под ред. *В.Н. Дублянского*. М.: Изд-во РУДН, 2002. 190 с.
11. *Максимович Г.А.* Основы карстоведения. Т. 1. Пермь: Пермское кн. изд-во, 1963. 445 с.
12. *Прокофьев С.С.* Роль конденсационной воды в образовании карстовых пещер // *Пещеры*. 1964. Вып. 4 (5). С. 35–38.
13. *Токарев С.В.* Уязвимость карстовых подземных вод Горного Крыма к загрязнению: выявление, оценка и картирование. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Симферополь: КФУ, 2020. 26 с.
14. *Токарев С.В., Амеличев Г.Н., Середя А.И., Брага Е.В.* Установление границ подземно-карстовых водосборов в верховьях р. Бельбек (Горный Крым) методом трассерных экспериментов // *Пятые Виноградские чтения. Гидрология в эпоху перемен*. СПб.: Изд-во ВВМ, 2023. С. 553–557.
15. *Шестопалов В.М., Климчук А.Б., Токарев С.В., Амеличев Г.Н.* Оценка уязвимости подземных вод районов открытого карста (на примере массива Ай-Петри, Крым) // *Спелеология и карстология*. 2009. № 2. С. 11–29.
16. *Aley T.* Findings from some hydrologic investigations in the epikarst // *Epikarst. Proc. symposium*, 2003. Shepherdstown: Karst Water Inst., 2004. Special publ. 9. P. 79–84.
17. *Brutsaert W.* Hydrology: an introduction. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2005. 605 p.
18. *Doctor D.H., Alexander Jr. E.C., Petric M., Kogovsek J. et al.* Quantification of karst aquifer discharge components during storm events through end-member mixing analysis using natural chemistry and stable isotopes as tracers // *Hydrogeol. J.* 2006. V. 14. P. 1171–1191.
19. *Ford D., Williams P.* Karst Hydrogeology and Geomorphology. Chichester: John Wiley Sons Ltd., 2007. 562 p.
20. *Lee E.S., Krothe N.C.* Delineating the karstic flow system in the upper Lost River drainage basin, south central Indiana: using sulphate and $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ as tracers // *Applied Geochem.* 2003. V. 18. № 1. P. 145–153.
21. *Long A.J., Valder J.F.* Multivariate analysis with end-member mixing to characterize groundwater flow: Wind Cave and associated aquifers // *J. Hydrol.* 2011. V. 409. P. 315–327.
22. *Perrin J.R.* A conceptual model of flow and transport in a karst aquifer based on spatial and temporal variations of natural tracers. Ph.D. diss. Lausanne: Univ. Lausanne, 2003. 187 p.

ASSESSMENT OF RIVER RUNOFF COMPONENTS IN THE CRIMEAN MOUNTAINS. 2. RUNOFF OF KARST AQUIFER SYSTEMS

**T. S. Gubareva^{a, *}, G. N. Amelichev^{a, b}, S. V. Tokarev^{a, b}, B. A. Vakhrushev^{a, b}, B. I. Gartsman^{a, c},
V. G. Naumenko^b, Ev. G. Amelichev^{a, b}, I. B. Vakhrushev^{a, b}**

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

^b*Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, 295007 Russia*

^c*Institute of Natural-Technical Systems, Sevastopol, 299011 Russia*

**e-mail: tgubareva@bk.ru*

For experimental basins of karst aquifer systems of Mountainous Crimea, a three-component mixing model has been adapted using geochemical tracers. On its basis, the following stable sources of supply have been established: epikarst water formed mainly in the near-surface fractured and weathered zone of karst rocks; surface-slope water differing in the formation mechanism; base flow water of including a mixture of groundwater from the aeration zones of karst mas-sifs below the epikarst and phreatic zones, providing the base part of the runoff hydrograph. Epikarst waters make up a significant share of the supply in the runoff of karst aquifer systems (> 30%). Close empirical relationships between the shares of the runoff components and the water discharges in the closing sections have been revealed.

Keywords: karst aquifer systems, sources of supply, chemical tracers, EMMA model, Crimean Mountains

УДК 556.5:556.3:551.44

ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМА КАРСТОВЫХ ВОД В СКЕЛЬСКОЙ ПЕЩЕРЕ (АЙ-ПЕТРИНСКИЙ МАССИВ, ГОРНЫЙ КРЫМ) И ИХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ¹

© 2024 г. С. В. Токарев^{a, b, *}, Г. Н. Амеличев^{a, b}

^aКрымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, 295007 Россия

^bИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

*e-mail: tokcrimea@list.ru

Поступила в редакцию 15.03.2024 г.

После доработки 15.03.2024 г.

Принята к публикации 21.05.2024 г.

Проанализированы данные многолетнего (2012–2023 гг.) мониторинга гидрологических (уровни) и физико-химических (температура, удельная электропроводность) характеристик карстовых вод Скульской пещеры. Параллельные наблюдения в противоположных частях пещеры (Западное и Восточное озера) выявили синхронность колебаний уровней, но различную динамику температуры, удельной электропроводности и изотопного состава вод. Различия физико-химических параметров особенно сильно проявляются в паводковые события, что указывает на поступление в пещеру двух потоков карстовых вод с разных водосборных площадей. В качестве таковых определены Карадагский и Тарпанбаирский питающие участки, занимающие разновысотные уровни и направляющие свои воды вдоль Карадагского сброса в сторону Западного и Восточного озер пещеры соответственно. Сравнение колебаний уровней вод в пещере с динамикой расходов Скульского источника, а также физико-химических и изотопных характеристик в паводки позволило установить сильную связь между ними. Таким образом, Скульский источник — основная точка разгрузки (дрена) карстовой водоносной системы Скульской пещеры.

Ключевые слова: карстовая водоносная система, область питания, подземный сток, физико-химический режим, удельная электропроводность, паводок, Ай-Петринский массив.

DOI: 10.31857/S0321059624060046 EDN: VPCELN

ВВЕДЕНИЕ

Согласно разным глобальным оценкам, от 9 [23] до 25% [19] населения Земли используют карстовые воды в качестве основного источника водоснабжения. В ряде стран (Австрия, Словения, Хорватия, Бельгия, Словакия, Франция, Италия) и крупных регионов (юго-западный Китай, штаты Техас и Флорида в США) доля карстовых вод в общем питьевом водопотреблении составляет $\geq 50\%$ [16]. Показательный пример такого региона — Крымский п-ов, где большая доля ($>90\%$) всех ресурсов пресных подземных вод приходится на трещинно-карстовые коллекторы, а карстовые источники играют ведущую роль в питании большинства рек и устроенных на них водохранилищ питьевого назначения [25].

Как правило, определение границ водосборов карстовых водоносных систем (КВС) сопряжено с большими трудностями, поскольку подземные водоразделы в условиях карста крайне редко совпадают с топографическими водоразделами [18]. Кроме того, они могут изменяться в зависимости от уровня водности [23]. Изучение режима вод КВС — ключ для выяснения условий формирования, транзита и разгрузки их подземного стока. Для этих целей широко применяется мониторинг гидрологических параметров карстовых вод совместно с различными физико-химическими, в том числе изотопными, характеристиками [15, 20, 24]. Наиболее информативны записи паводковых событий [13, 21, 22].

Скульская пещера — одна из богатейших в спелеоресурсном плане карстовых полостей Горного Крыма [1]. Разным аспектам изучения Скульской пещеры посвящено несколько десятков научных статей и монографий. Это брэн-

¹ Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 23-27-00236, <https://rscf.ru/project/23-27-00236/>).

довый объект в структуре Севастопольского туристско-рекреационного района. В непосредственной близости от Скульской пещеры находится одноименный карстовый источник — один из крупнейших очагов разгрузки карстовых вод в Горном Крыму и самый крупный в его западной части. Поэтому Скульская пещера — один из ключевых объектов для выяснения гидрогеологических условий Ай-Петринского массива и всего юго-западного Крыма.

Несмотря на высокую популярность и научную ценность, Скульская пещера остается еще малоизученной в спелеологическом и гидрогеологическом плане. В частности, не до конца решены вопросы положения ее водосборных площадей, участков транзита стока и особенностей разгрузки. Требуется детальная гидрогеологическая интерпретация гидрологического и физико-химического режима карстовых вод пещеры. Решение некоторых из этих аспектов, которые можно рассматривать в качестве задач данной работы, стало возможным благодаря материалам многолетних экспедиционных и маршрутных исследований в окрестностях пещеры, относительно длительному (с 2012 г.) ряду мониторинговых наблюдений за карстовыми водами, выполненных на созданном авторами пещерном стационаре.

Представляемая работа посвящается памяти выдающегося мирового карстолога и гидрогеолога А.Б. Климчука (1956–2023 гг.), по чьей инициативе были начаты режимные наблюдения карстовых вод в Скульской пещере.

КАРСТОЛОГО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Пещера Скульская расположена в основании западного склона Ай-Петринского массива, в 1,5 км к востоку от с. Родниковского Орлиновского муниципального округа в составе города федерального значения Севастополя (рис. 1а). Согласно схеме карстологического районирования [2], пещера относится к Западно-Айпетринскому карстовому району Горно-Крымской области.

Скульская пещера заложена в массивных, местами брекчированных известняках верхнего

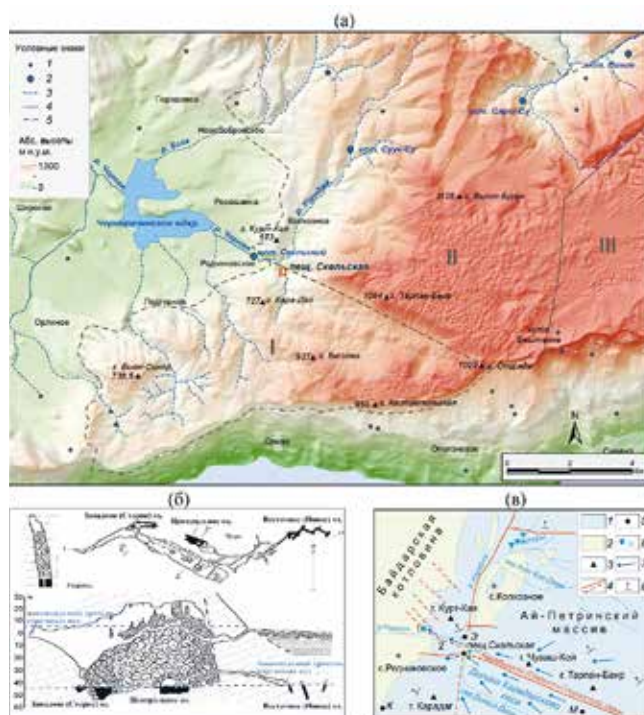


Рис. 1. Расположение, морфология и геологические условия Скульской пещеры: а — орогидрографические условия района расположения исследуемого объекта (1 — мелкие родники, 2 — крупные карстовые источники, водотоки: 3 — временные, 4 — постоянные, 5 — границы карстовых подрайонов: I — Западно-Айпетринский, II — Центрально-Айпетринский, III — Восточно-Айпетринский); б — план и разрез Скульской пещеры (основа из [5]); в — схематическое геологическое строение района Скульской пещеры (породы: 1 — верхнеюрские известняки, 2 — нижнемеловые глины; 3 — основные вершины; 4 — тектонические разрывы; 5 — карстовые полости (Э — Энтузиастов, К — Кирилловская, М — Максимовича); 6 — постоянные и временные источники; 7 — направления подземного стока; 8 — элементы залегания пород).

титона. По происхождению пещера относится к коррозионно-тектоническому типу, коррозионно-разрывному классу [6]. Разведанная протяженность всех ходов пещеры 670 м, амплитуда — 130 м (включая 65 м сухой части и 65 м подводной; глубина от входа до базисного уровня карстовых вод — 45 м, максимальное превышение относительно входа +20 м), площадь — 1140 м², объем — 11000 м³ [12].

Вход в подземную полость расположен в небольшой котловине — устьевой части долины Карадагского леса — и лежит на абсолютной отметке 315 м. Морфология привходовой части

представлена круто наклонным сифонным каналом, из которого можно попасть в верхнюю и нижнюю части пещеры, разделенные мощным глыбовым завалом (рис. 16). В межглыбовых проходах завала проложена экскурсионная тропа в верхний пещерный зал длиной 80 м, шириной 10–18 м, высотой 10–25 м, образованный при раскрытии тектонического нарушения.

В нижней части пещеры известно несколько озер, относящихся к фреатической гидродинамической зоне карстового массива, условно названных авторами статьи Западным, Центральным и Восточным (рис. 16). Западное (также известное как Старое) и Центральное озера, находящиеся под верхним залом, объединяются в одну обводненную зону тектонического разрыва, контролирующего заложение основного объема пещеры. Глубина озерной системы, по данным спелеоподводных исследований Центрального озера, составляет ≥ 65 м. На спуске к Центральному озеру на высоте ~ 12 м от его меженного уровня начинается хорошо промытая наклонная галерея с напорно-фреатической морфологией, простирающаяся в восточном направлении и оканчивающаяся сетью обводненных ходов (трещинно-сифонная система). Этот обводненный участок, расположенный под выполненной нижнемеловыми глинами Скульской котловины, далее именуется Восточным (или Новым) озером (рис. 16). По данным геофизической разведки, на север от Восточного озера в сторону р. Узунджа прослежено продолжение обводненных каналов протяженностью ~ 400 м [3]. В паводки уровень карстовых вод в пещере повышается на 5–20 м, а при их экстремальных проявлениях – на 30–45 м вплоть до излияния вод из входа. Такие события обычно происходят при наложении сильных ливней на снеготаяние [7].

В литературе имеются лишь отрывочные сведения о положении водосборной площади КВС Скульской пещеры. Одним из первых, кто попытался установить ее контур, был В.Н. Дублянский [9], который по результатам индикаторных опытов 1970-х гг. сделал вывод о том, что пещера относится к КВС, заложенной вдоль Карадагского (Скульско-Спирадского, по [4]) сброса и включающей также крупную пещеру Кристальную им. Г.А. Максимовича [8]. К области пита-

ния КВС Скульской пещеры относили восточные склоны г. Карадаг (727 м), хр. Домузоран, северо-восточные склоны гор Бюзюка (922 м) и Балчик-Кая (945 м). С юга область питания ограничивали кромкой Главной гряды на участке от г. Кастропольской (955 м) до г. Спирады (1029 м). Ключевую роль при выделении северо-восточных и северных границ КВС Скульской пещеры играл, по мнению исследователей советского периода, Карадагский сброс, который экранировал отток подземных вод к северу и перенаправлял его в сторону Скульской пещеры. Поэтому здесь граница проводилась по Тарпанбаирскому хребту до Скульской котловины. Оконтуренный в этих границах участок площадью ~ 18 км² получил название “Карадагский блок”. Расположенный севернее Карадагского сброса смежный Тарпанбаирский (Скульско-Айдмитровский) блок, как считалось, питается водами поля Бештекне и Центрально-карстового плато (ЦКП), разгружая их в долину р. Узунджа и в источник пещеры Черной (Скульский источник). Гидравлическая связь между Карадагским и Тарпанбаирским блоками отрицалась на основании индикаторных опытов, различий характера трещиноватости, пещерного микроклимата и биоты. Однако при проведении воднобалансовых работ [11] указанные участки объединялись в один гидрогеологический блок – Скульско-Байдарский.

В контурах водосборной площади Скульской пещеры среди карстующихся пород доминирующее развитие получили массивные верхнеюрские известняки титонского яруса, мощность которых варьирует от 300 до 500 м. Они падают к северо-западу под углом 20–30°. В Байдарской котловине и депрессии у входа в Скульскую пещеру титон-валанжинские карбонаты перекрываются валанжин-готеривскими глинами. Мощность слабопроницаемых глин Скульской котловины достигает 40 м. Согласно геофизическим данным и съемкам тектонической трещиноватости, выполненным Комплексной карстовой экспедицией [3], у Карадагского и Скульского участков водосбора господствующее простираение трещин составляет 280–300° (Карадагский сброс, Скульская пещера), а второстепенное – 10–30° (меридиональный участок оврага Донгуз-Дере). Строение отмеченных участков характеризуется как моноклинально-блоковое (рис. 1в).

Платообразные участки водосбора характеризуются повсеместным развитием открытого и задернованного карста, ярко выраженной эпикарстовой зоной и мощной зоной аэрации. Среди поверхностных карстовых форм самые распространенные — карры и воронки. Плотность последних на участке к северу от Тарпанбаирского хребта достигает >60 шт/км², а средняя глубина составляет >5 м. Здесь же наблюдается максимальная (>20 шт/км²) концентрация подземных карстовых полостей. Высокие показатели закарстованности и атмосферных осадков обеспечивают максимально благоприятные условия для формирования подземного стока в водосборе.

Склоновые участки водосбора имеют значительные площади, располагаясь между яйлинскими плато и межгорными котловинами. Их основу составляет долина Карадагского леса, представляющая собой спускающуюся к северо-западу центральную часть горного амфитеатра между Тарпанбаирским хребтом, гребнем Главной гряды и цепью вершин по линии Карадаг — Балчик-Кая. Увеличение уклонов поверхности и расчлененности рельефа, снижение количества осадков и появление лесной растительности на бурых горнолесных почвах ведут к снижению поверхностной и подземной закарстованности, замене открытого карста покрытым, развитию карстово-эрозионного рельефа. Тем не менее поверхностный сток в долине Карадагского леса — довольно редкое и кратковременное явление, наблюдаемое только в дни интенсивных ливневых дождей и имеющее сравнительно невысокие расходы (обычно <100 л/с). Таким образом, большая часть эффективных атмосферных осадков, выпадающих на склоновых участках водосбора, также расходуется на питание карстовых вод.

МЕТОДИКА РАБОТ

Основой для изучения режима карстовых вод в Скульской пещере послужили многолетние ряды наблюдений основных гидрологических и физико-химических параметров (уровень, температура, удельная электропроводность), получаемые с помощью автономных регистраторов. Наиболее длительный ряд (с 2012 по 2023 г. с перерывами в 2016–2018 гг.) получен по точке, расположенной в Западном (Старом) озере пещеры.

Высотная отметка точки установки регистратора ~ 270 м н.у.м., что на ~ 1 м ниже межennale (базисного) уровня карстовых вод. По второй точке, расположенной в Восточном (Новом) озере, получен параллельный ряд измерений, охватывающий 2021–2022 гг. Временное разрешение измерений составляет 30 мин. При наблюдениях использовались регистраторы (логгеры) “Solinst LTC Levellogger Junior”, “Solinst Levellogger Edge” и “Гидрометрика 505-УТП”. Для компенсации атмосферного давления в верхних залах пещеры синхронно проводились барометрические измерения регистратором “Solinst Barologger Edge”. Измеренные значения прямой электропроводности приводились к стандартной температуре 25°C с использованием температурного коэффициента 2% на 1°C. Примерно 1 раз в квартал проводились визуальные наблюдения уровня вод и контрольные измерения температуры и электропроводности с помощью портативных кондуктометров. Значимых отклонений в измерениях автономными регистраторами в сравнении с контрольными данными выявлено не было.

В период с 2016 по 2018 г., не охваченный непрерывными автоматизированными наблюдениями, в отдельные паводковые события проводились прямые измерения физико-химических показателей карстовых вод в разных частях пещеры с использованием портативных кондуктометров и рН-метров. Параллельно с этим отбирались пробы воды на анализ изотопного состава (содержание $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$). Более подробно программа таких наблюдений и процедура последующих изотопных измерений описаны в работе [13]. Кроме того, в течение всего срока наблюдений проводились разовые опробования вод на изотопный состав, результаты которых частично представлены в работе [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Полученный ряд наблюдений включает 7 полных лет (2013–2015, 2019, 2021–2023 гг.) и 3 неполных года (2016, 2018, 2020 гг.), что позволяет выявить общие черты сезонной динамики карстовых вод.

За время работы автономных регистраторов зафиксировано >10 случаев подъемов уровня

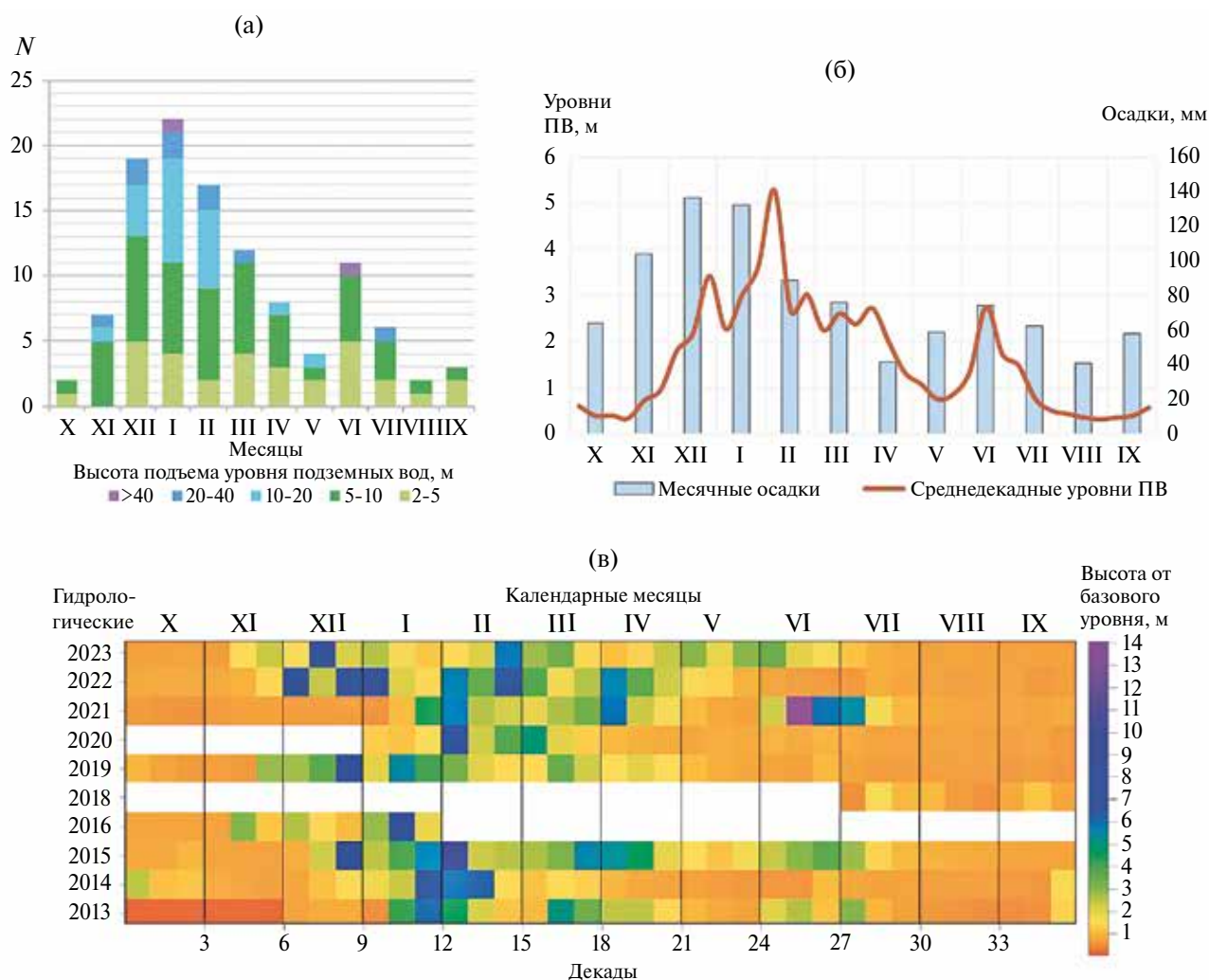


Рис. 2. Характеристики гидрологического режима карстовых вод в Скельской пещере за 2013–2023 гг.: а – распределение паводковых событий разной силы (подъемов уровня карстовых вод разной высоты) по месяцам; б – внутригодовая динамика среднедекадных уровней карстовых подземных вод и среднемесячные суммы осадков по м/с Ай-Петри; в – растровая диаграмма среднедекадных уровней карстовых вод за период наблюдений (пустые клетки соответствуют перерывам в наблюдениях). Границы гидрологического года приняты с октября предыдущего календарного года по сентябрь указанного года.

карстовых вод на высоту >2 м. Более половины (58) таких событий пришлось на зимний сезон (рис. 2а). Их причиной послужили зимние оттепели, которые в Крымских горах (особенно в их западной части) – частое явление, происходящее от нескольких до десятка раз в сезон. Чаше всего подъемы уровня карстовых вод в Скельской пещере происходили в январе (22 события). Также январь – лидер по количеству крупных (паводковых) подъемов на высоту >10 м (11 событий). В течение весеннего сезона частота колебаний уровня карстовых вод стремительно уменьшается: от 12 событий в марте до 4 в мае. В июне частота подъемов значительно увеличивается (до

11 событий), однако их высота в основном не достигает 10 м (за исключением экстремально-го паводка в июне 2021 г.). Реже всего подъемы фиксировались в августе, октябре (по 2 события за весь срок наблюдений) и сентябре (3 события), и все они были <10 м. В ноябре число колебаний увеличивается (7 событий), в том числе зафиксирован 1 средний (высота 10–20 м) и 1 крупный паводок (20–40 м).

Подекадное осреднение зафиксированных уровней показывает, что наибольшие средние отметки стояния карстовых вод отмечаются в первой декаде февраля (~ 5 м выше базисного

уровня), при этом максимум осадков приходится на декабрь и январь (рис. 2б). Некоторое запаздывание повышенных уровней карстовых вод в Скельской пещере от максимума осадков на Ай-Петринском плато не вызывает удивления, поскольку последние выпадают преимущественно в виде снега, который может сохраняться на водосборе несколько недель до наступления оттепелей. С конца февраля по начало апреля средние уровни карстовых вод составляют ~3 м выше базисного уровня (в.б.у.). В мае их величина превышает базисный уровень на <1 м, в июне — вновь увеличивается до 3 м в.б.у. С конца июля по начало ноября уровень карстовых вод в пещере, как правило, находится максимально близко к базисным значениям.

На растровой диаграмме среднедекадных уровней карстовых вод (рис. 2в) четко прослеживается доминирование холодной части года (XII–IV) в формировании высокой водности КВС. В теплой части года (V–XI) можно выделить 2 периода: относительно высокой водности (V–VI), связанной с выпадением осадков летнего максимума, и низкой водности (VII–XI), связанной с меженной фазой. Четко выделяются засушливые (2014, 2020) и влажные (2015, 2021, 2023) годы, которые также отмечаются в гидрологических событиях всего Крыма.

Режим колебаний уровня карстовых вод в Скельской пещере имеет выраженный паводковый характер (рис. 3), что свойственно для кар-

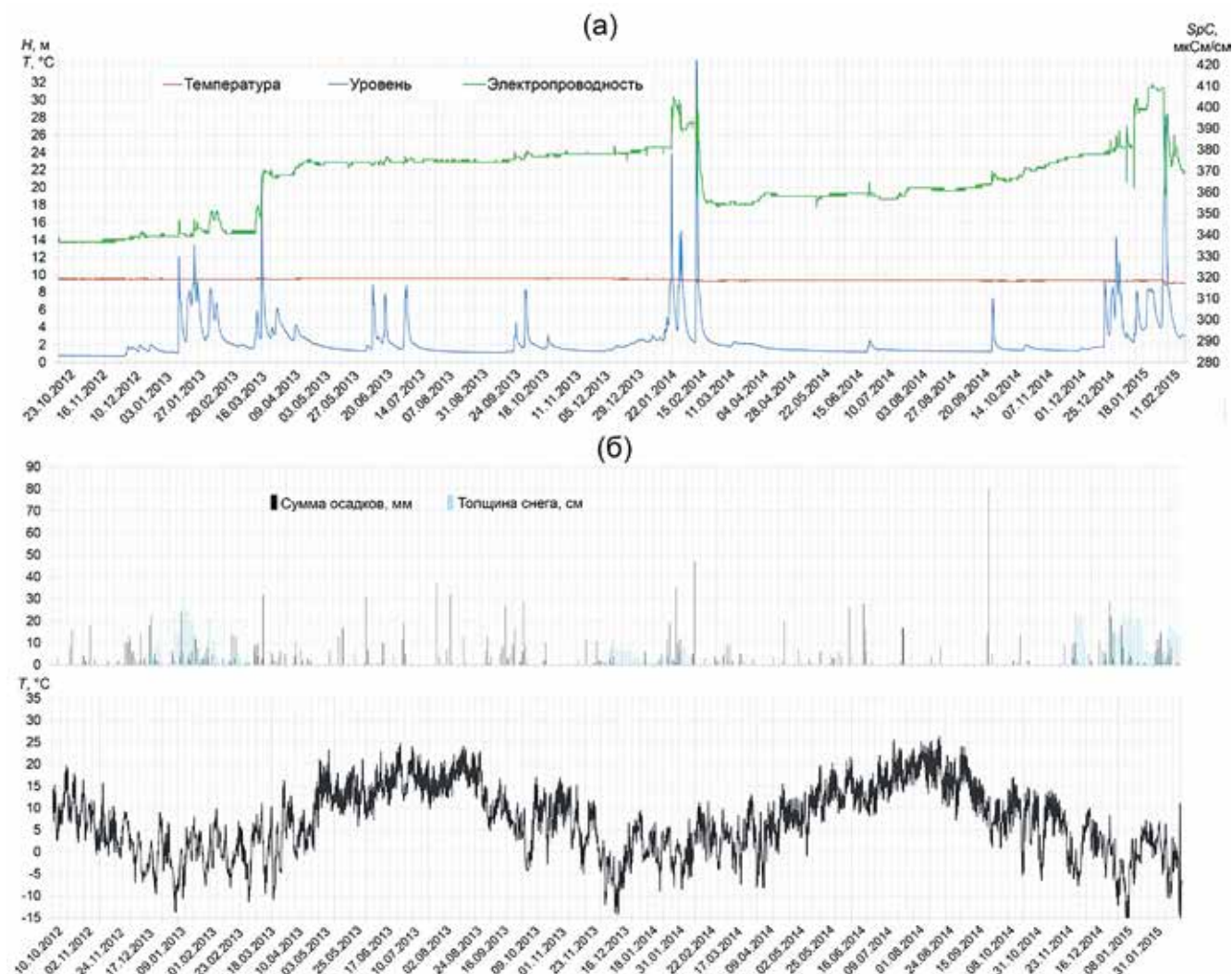


Рис. 3. Динамика основных гидрологических и гидрохимических параметров карстовых вод в Западном озере Скельской пещеры (а) и ход осадков и температуры по м/с Ай-Петри (б) за период с октября 2012 г. по февраль 2015 г.

стовых водоносных систем (КВС) горных областей. Характерна быстрая реакция уровня вод на выпадение ливневых осадков: лаг начала подъема уровня по отношению ко времени выпадения критического количества осадков обычно составляет 3–6 ч (при высокой заполненности КВС – первые часы), а лаг достижения максимального пика – 12–24 ч. В засушливые периоды, когда выпадения осадков не происходило в течение ≥ 2 недель, существенные подъемы (на ≥ 2 м) уровня карстовых вод наблюдались только при ливневых дождях с интенсивностью 60–80 мм/сут. В периоды высокой влажности при высокой заполненности КВС такой эффект могут производить осадки гораздо меньшей интенсивности – 20–40 мм/сут. Самые сильные паводки обычно происходят в результате наложения сильных дождевых ливней на таяние снега (например, паводок 10–13 февраля 2014 г., показанный на рис. 4).

Температурный режим карстовых вод в пещере отличается высокой стабильностью. Фоновая

температура за весь срок наблюдений составляла $\sim +9.8^{\circ}\text{C}$. Во время паводков происходят малозначительные колебания температуры вод, обычно $0.1\text{--}0.2^{\circ}\text{C}$, независимо от сезона года. В условиях экстремального паводка в июне 2021 г. колебания температуры карстовых вод были максимальными – от $+9.3^{\circ}\text{C}$ до $+10^{\circ}\text{C}$. Характерно то, что при наиболее сильных паводках зимнего периода температура вод опускалась на $\leq 0.6^{\circ}\text{C}$. Возвращение температуры к фоновому значению может происходить как сразу по окончании паводка (паводок 10–13 февраля 2014 г. (рис. 4)), так и в течение длительного времени (до нескольких недель, как при паводке в июне 2021 г.).

Общий гидрохимический режим карстовых вод в Скельской пещере может быть охарактеризован по динамике удельной электропроводности (УЭ или SpC), которая отражает изменение общей минерализации воды. Полученный ряд наблюдений показывает сильную связь коле-

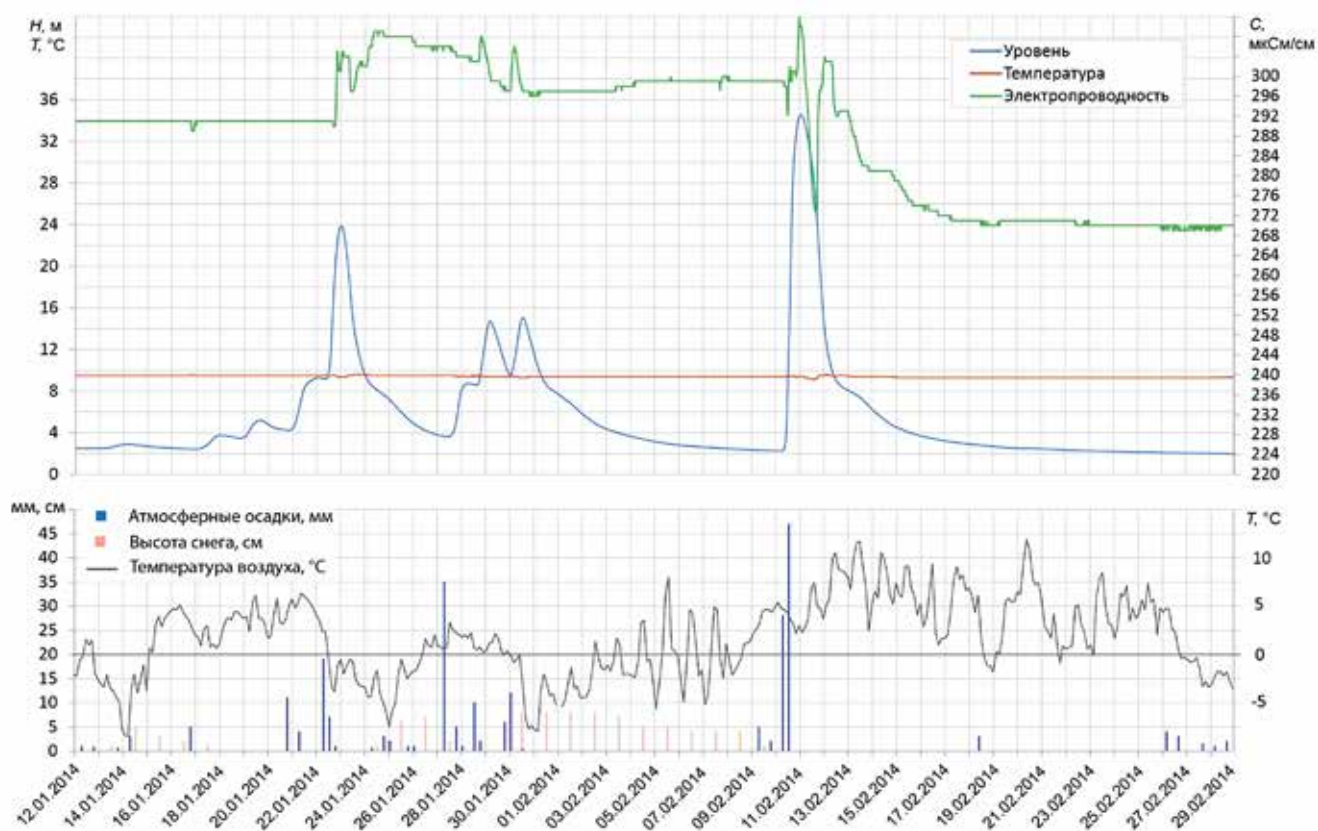


Рис. 4. Динамика основных гидрологических (уровень) и физико-химических (температура, прямая электропроводность) параметров карстовых вод в Западном озере Скельской пещеры (верхняя диаграмма) и ход осадков и температуры по м/с Ай-Петри (нижняя диаграмма) в течение января и февраля 2014 г.

баний электропроводности (минерализации) с подъемами уровня карстовых вод (рис. 3–5). Поведение минерализации в течение паводков может быть разным. Практически во всех случаях отмечается рост минерализации синхронно с

подъемом уровня вод. Приближаясь к пику водного уровня, или сразу после его достижения рост минерализации сменяется ее падением. На спаде водного уровня минерализация достигает некоторого минимума, после чего зачастую на-

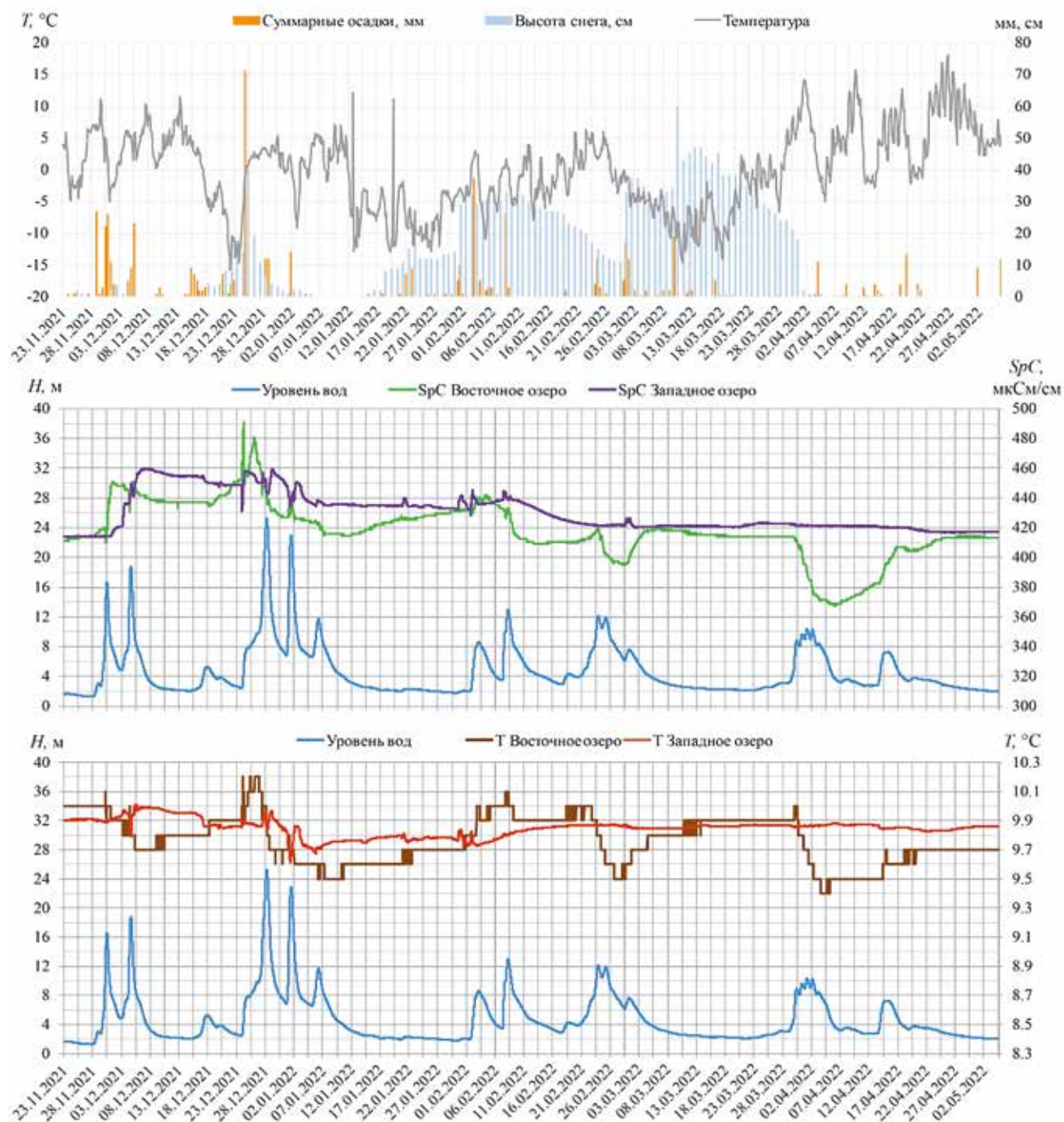


Рис. 5. Записи параллельной серии гидролого-гидрохимических наблюдений в Западном и Восточном озерах Скульской пещеры за зимне-весенний период 2021–2022 гг. Верхняя диаграмма представляет ряд температуры и атмосферных осадков по м/с Ай-Петри. Средняя диаграмма показывает колебания удельной электропроводности вод в озерах на фоне общих колебаний уровня. Нижняя диаграмма показывает колебания температуры вод в озерах.

ступает новый подъем минерализации, довольно быстро достигающий первого пикового значения и даже превышающий его. После этого на завершающей стадии паводка значение минерализации плавно опускается. Характерно, что установившийся после окончания паводка уровень минерализации, как правило, существенно отличается от допаводкового. Например, после паводка в марте 2013 г. УЭ увеличилась на ~35 мкСм/см по сравнению с допаводковой, а после паводка в феврале 2014 г. — уменьшилась на 30 мкСм/см (рис. 3). Как правило, после паводков средней силы (подъем уровней до 20 м) происходит некоторое увеличение фоновой минерализации, а после сильных паводков (подъем уровня >20 м) либо после плотной череды средних паводков чаще всего фоновая минерализация уменьшается. Таким образом, многолетняя динамика минерализации имеет “ступенчатый” характер. Однако восходящие “ступени” наблюдаются значительно чаще, чем нисходящие, что приводит к постепенному росту фоновой минерализации карстовых вод. В течение срока наблюдений УЭ увеличилась с 330 до 450 мкСм/см. Таким образом, годовой прирост этого параметра для карстовых вод Скульской пещеры (Западное озеро) составляет в среднем чуть >10 мкСм/см.

Следует отметить, что в некоторых случаях средние подъемы (до 10 м) уровня карстовых вод практически не сказывались на изменении минерализации в точке наблюдений. Такое отмечалось, например, при подъемах уровней в летне-осенний период 2013 г. (рис. 3а). В других случаях паводки аналогичной силы приводили к увеличению и уменьшению минерализации с одним выраженным пиком (например, подъемы уровня в январе и феврале 2013 г.).

Для сравнения гидролого-гидрохимического режима карстовых вод в противоположных частях пещеры используются ряды параллельных наблюдений в Западном и Восточном озерах, проводившихся в течение зимне-весеннего периода 2021–2022 гг. В данных точках наблюдений проявляются значительные различия динамики температуры и УЭ вод при синхронных колебаниях уровня карстовых вод (рис. 5). Отметим, что при базисном уровне вод УЭ и температура вод в указанных озерах имеют довольно

близкие значения. При наступлении подъемов уровня данные показатели начинают разниться между озерами. На пиках средних и крупных паводков (высота подъема уровня вод >10 м) показания между ними уравниваются как по УЭ, так и по температуре. На спадах уровня между озерами снова возникают значительные различия по указанным показателям, которые нивелируются в течение некоторого времени после приближения уровня карстовых вод к базисной отметке. В некоторых случаях во время подъема уровней вод на 10–12 м отмечаются заметные колебания в одном из озер (чаще всего в Восточном) при отсутствии таковых в другом (чаще всего — в Западном). Например, это наблюдалось при событиях 1 декабря 2021 г., 24–26 февраля, 1–4 и 15–16 апреля 2022 г. В целом, для Восточного озера выявляется существенно большая амплитуда колебаний как УЭ, так и температуры.

Согласно [17], изотопный состав вод, отобранных в разные сезоны из Западного озера Скульской пещеры, характеризуется вариацией содержания $\delta^{18}\text{O}$ от -10.3 до -9.5‰ и $\delta^2\text{H}$ от -71.5 до -64.5‰ . Близкие значения изотопного состава были получены для вод Скульского источника. Пробы воды из Скульской пещеры, отобранные после прохождения паводка в январе 2022 г., показали следующие изотопные содержания: для Западного озера $\delta^{18}\text{O} = -8.94\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} = -56.9\text{‰}$, для Восточного озера $\delta^{18}\text{O} = -9.7\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} = -58.7\text{‰}$.

В ходе оперативных наблюдений паводкового события в феврале 2018 г. выявлено, что карстовые воды из противоположных частей пещеры демонстрируют разную динамику изотопного состава, температуры и минерализации [13]. Восточное озеро на протяжении всего паводка характеризовалось практически неизменным изотопным составом. Перед максимальным подъемом воды отмечено некоторое уменьшение содержания тяжелых изотопов, а к концу срока наблюдений — увеличение ($\delta^{18}\text{O}$ от -10.2‰ до -9.8‰). Аналогичная динамика изотопного состава наблюдалась на Скульском источнике, в пещерах Огненный грифон и Энтузиастов. Вода в Западном озере Скульской пещеры во время паводка имела отличный изотопный состав с гораздо большим содержанием

тяжелых изотопов: в начале паводка $\delta^{18}\text{O}$ от -8.8 до -9.1‰ , в конце $\delta^{18}\text{O} = -8.9\text{‰}$. В пик паводка содержание тяжелых изотопов в Западном озере уменьшилось ($\delta^{18}\text{O} = -9.6\text{‰}$) и приблизилось к значениям в Восточном озере, источниках Скульского и Огненного грифона (рис. 6). Характерно то, что величины общей минерализации вод этих объектов во время пика паводка также были близки, а до и после пика существенно различались.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Хотя структура, гидродинамические условия и гидрохимический фон отдельных КВС, как правило, имеют свои особенности, обычно при прохождении паводков выделяется несколько общих фаз гидрохимической динамики вод карстовых источников [19]:

1. Задержка (лаг) — от начала выпадения интенсивных осадков до появления изменений в характеристиках карстовых вод.

2. Подъем уровней — уровень (расход) карстовых вод начинает стремительно повышаться при сохранении значений температуры и минерализации вод, что соответствует выходу каналовых вод фреатической зоны в результате передачи

гидравлического давления со стороны области питания (“поршневой эффект”).

3. Выход “старых” вод — при приближении к пика паводка минерализация (зачастую и температура) вод начинает расти вследствие прихода вод из эпикарстовой зоны и трещинных коллекторов, связанных с карстовыми каналами.

4. Выход “свежих” вод — наступает на пике или спаде уровня (расхода) карстовых вод, сопровождается уменьшением минерализации (эффект разбавления), изменением температуры, увеличением мутности и содержания органического углерода, что связано с приходом поверхностно-склоновых (инфлюационных) вод либо свежих инфильтрационных вод.

5. Возврат — гидродинамические и гидрохимические характеристики карстовых вод постепенно приближаются к допаводковым (базисным) значениям.

Динамика минерализации карстовых вод в Скульской пещере имеет отличия от описанной выше последовательности фаз. Во-первых, на сильных паводках часто наблюдаются не один, а два пика минерализации. Первый пик обычно отмечается на подъеме уровня карстовых вод

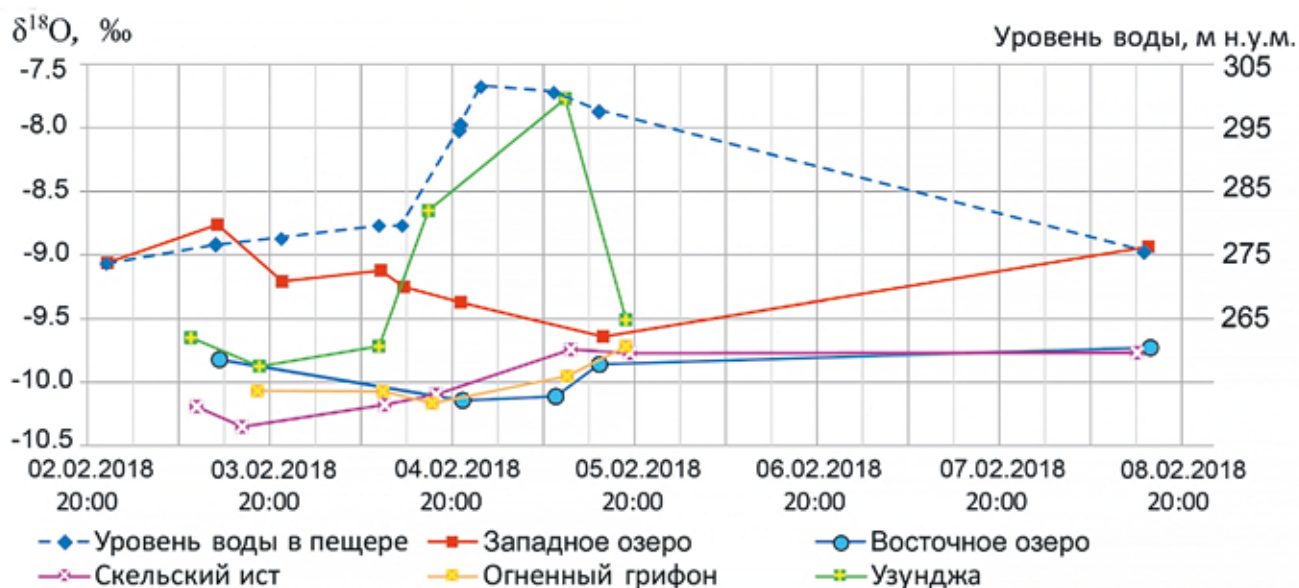


Рис. 6. Динамика содержания $\delta^{18}\text{O}$ в озерах Скульской пещеры и других крупных водопоявлениях (источники Скульский и Огненный грифон, р. Узунджа) ее окрестностей во время паводка в феврале 2018 г.

либо на его максимуме, что соответствует фазе выхода “старых” вод. Второй пик минерализации происходит на спаде уровня вод ближе к его завершению. Согласно представленной выше стандартной динамике, в это время должно происходить возвращение гидрохимических параметров вод к допаводковому состоянию (фаза возврата). Другое значительное отличие — то, что после завершения паводка минерализация воды практически никогда не возвращается к исходному значению, а оказывается либо выше, либо ниже допаводковой минерализации.

Похожая аномалия двойных пиков УЭ (следовательно, и минерализации) карстовых вод на паводках обсуждается в работе [22] на примере одного из карстовых источников в Словении. В упомянутом исследовании обнаружено, что данная аномалия связана с изменчивостью границ водосбора указанной КВС: при повышении уровня карстовых вод область питания расширяется с подключением более удаленного водосборного участка, который при базисном уровне вод питает другой карстовый источник. Таким образом, возникают две волны ионного паводка: от ближней и от дальней области питания.

Очевидно, что в случае КВС Скельской пещеры имеет место похожая ситуация. Двойные пики минерализации индицируют две одновременные волны поступления “старых” эпикарстовых и трещинных вод. Следовательно, КВС имеет сложную область питания, включающую как минимум 2 водосборных участка, находящихся на разном удалении от пункта мониторинга и/или имеющих разные условия и скорости движения карстовых вод. В качестве рабочей гипотезы принимаем деление водосборной площади Карадагского блока на 2 части: ближнюю, главным образом соответствующую долине Карадагского леса (склоновая часть водосбора), и дальнюю, включающую платообразную (яйлинскую) часть водосбора.

Анализ параллельных рядов наблюдений (рис. 5, 6) во фреатических озерах, расположенных в противоположных частях пещеры (Западное и Восточное озера), выявил наличие двух потоков карстовых вод, имеющих существенные различия по физико-химическим параметрам

и их динамике. Несмотря на общую динамику уровня вод, в межень и на переходных к паводкам этапах общая минерализация и температура в водоемах могут существенно различаться. По-разному происходит изменение минерализации и температуры в озерах и при прохождении паводковых волн, хотя уровни меняются синхронно. Все это приводит к мысли, что каждое из озер имеет свою собственную область питания, а гидравлическая связь между ними в межень осуществляется через сеть узких каналов или трещин, препятствующих быстрому выравниванию химических и термических показателей. Лишь в наиболее сильные паводки, когда уровни поднимаются на ≥ 12 м выше меженного и достигают крупных ходов, происходит быстрое перемешивание вод и выравнивание температуры и химизма воды в противоположных частях пещеры.

При подъеме уровней вод на высоту < 12 м колебания физико-химических показателей могут происходить только в одном из резервуаров, в другом они остаются стабильными. Такие случаи наблюдались в конце ноября 2021 г., в конце февраля и начале апреля 2022 г., когда заметные изменения УЭ происходили только в Восточном озере (рис. 5). Судя по всему, это связано с различием гидрометеорологических условий в разных частях водосбора. Например, последние два события связаны с интенсивным стаиванием снежного покрова в результате резкого потепления, которое наблюдалось на центральном карстовом плато (ЦКП) Ай-Петринского массива. К этому времени на склоновой части водосбора снег уже практически растаял. Предположительно поэтому физико-химические показатели в Западном озере в обозначенные периоды не менялись.

Дополнительный аргумент в пользу функционирования в Скельской пещере двух потоков карстовых вод, имеющих разные водосборные площади, — данные об изотопном составе вод в Западном и Восточном озерах. Как указано выше, последний водоем имеет значительно более легкий изотопный состав воды, что, очевидно, связано с более низкими значениями температуры ее образования, следовательно — с более высоким положением области питания. Такая область, обладающая значительными площадя-

ми, наиболее вероятно — участок ЦКП Ай-Петри к северо-востоку от Тарпанбаирского гребня с высотными отметками 1050–1100 м н.у.м. Резервуар карстовых вод, к которому относится Западное озеро, судя по всему, получает прямое питание с площади Карадагского блока с преобладающими высотными отметками 800–1000 м н.у.м.

Таким образом, принимая ранее выделенные западную и южную границы Карадагского блока за соответствующие контуры питающей области, к водосбору КВС Скульской пещеры

следует добавить часть Тарпанбаирского блока с восточной границей, проходящей по поднятию цоколя на меридиане поля Бештекне, и северной границей, проходящей по резкому перегибу склона к югу над оврагом Куш-Кая-Дере (рис. 7). Общая площадь водосбора, таким образом, составит ~38 км². Ключевое гидрогеологическое значение в распределении карстовых вод имеет Карадагский сброс, делящий водосбор Скульской пещеры на два блока. Поверхность юго-западного Карадагского блока опущена на ~200 м по отношению к поверхности северо-восточного Тарпанбаирского блока. Подземные

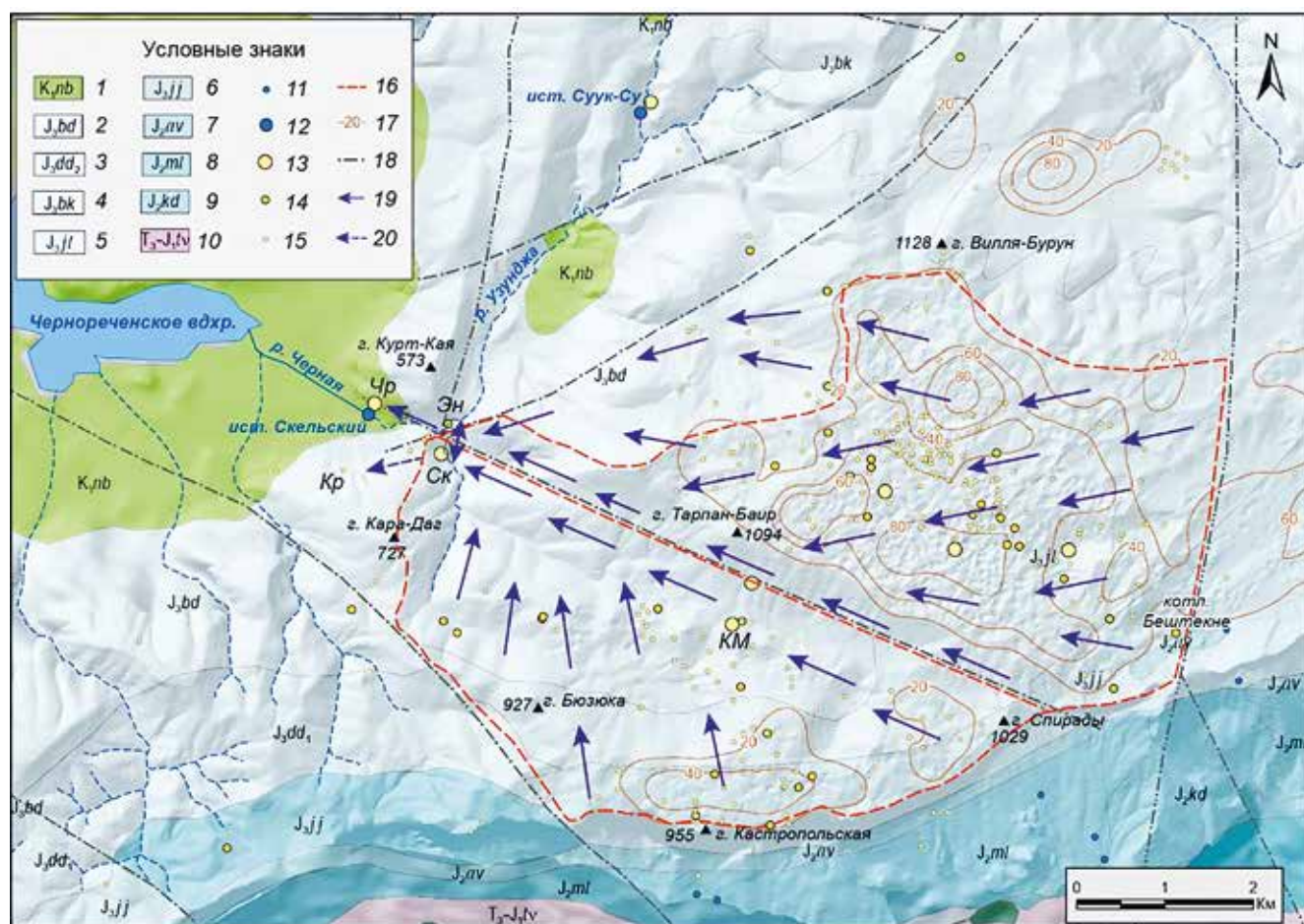


Рис. 7. Схема подземно-карстового стока КВС Скульской пещеры и Скульского источника. Стратиграфические ярусы: 1 — новобобровская толща (глины), 2 — байдарская свита (известняки), 3 — деймендеринская свита (глины, известняки), 4 — беденекырская свита (известняки), 5 — ялтинская свита (известняки), 6 — яйлинская свита (известняки), 7 — айвасильская свита (песчаники, глины), 8 — меласская свита (песчаники, алевролиты, аргиллиты), 9 — карадагская свита (лавы), 10 — таврическая серия (песчаники, алевролиты, аргиллиты). Остальные обозначения: 11 — мелкие родники; 12 — крупные карстовые источники; карстовые полости: 13 — крупные (Ск — Скульская, КМ — Кристалльная—Максимовича, Чр — Черная), 14 — значительные (Эн — Энтузиастов), 15 — мелкие (К — Кирилловская); 16 — предполагаемые границы водосбора КВС Скульской пещеры, 17 — изолинии плотности карстовых воронок (ед/км²), 18 — тектонические нарушения, 19 — предполагаемые направления подземно-карстового стока, 20 — то же во время паводков.

воды, стекающие от гребня Главной гряды к северу, концентрируются у южной стороны экрана Карадагского сброса и далее мигрируют вдоль него на северо-запад. Часть подземного стока приподнятого Тарпанбаирского блока также направлена к Карадагскому сбросу и барражирует вдоль северной стороны экрана к Скульской пещере. Благодаря хорошо выдержанной внутренней зональности сброса карстовые воды по обе стороны милонитового экрана движутся, не перемешиваясь. Только при пересечении сброса Узунджинским разломом (Скульский гидрогеологический узел) в экране возникает ослабленная высокопроницаемая зона, где возможно смешивание вод обоих блоков. Именно в этой зоне расположена Скульская пещера, восточная оконечность которой (Восточное озеро) получает питание с Тарпанбаирского блока, а западная (Западное озеро) — с Карадагского.

Сравнение среднесуточных уровней карстовых вод в Скульской пещере с расходами на р. Черной по гидропосту, расположенному ниже Скульского источника, за двухлетний период показало наличие сильной связи между ними. Отмечены синхронность их динамики (рис. 8а) и высокая степень корреляции, определяемая коэффициентом аппроксимации $R^2 = 0.934$ при использовании полинома 2-го порядка (рис. 8б). “Отскакивающие” точки, по-видимому, связаны с отклоняющим влиянием водосбора р. Узун-

джи, расположенного выше Скульского источника. Гидрологическая связь Скульской пещеры с одноименным источником, исходящим из пещеры Черной, также подтверждается исследованиями крымских гидробиологов и биоспелеологами. Ими установлено, что в противовес бытовавшим представлениям о наличии в этих пещерах троглобионтных видов-антагонистов и, следовательно, об изолированности водотоков, фауна на самом деле едина [10].

Таким образом, существует гидравлическая и физико-химическая связь между водами КВС Скульской пещеры и КВС пещеры Черной, которая наиболее сильно проявляется в мощные паводки, когда воды Восточного и Западного озер объединяются через систему крупных галерей. Становится очевидным, что система Восточного озера в Скульской пещере связана с пещерами Черной, Энтузиастов и Огненный грифон, следовательно — и со Скульским источником, хорошо проработанными каналово-полостными структурами. Это обстоятельство следует учитывать при создании гидрогеологических моделей карстового стока Ай-Петринского района, которые активно разрабатываются в последнее время [14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты многолетнего мониторинга карстовых вод в комплексе с анализом

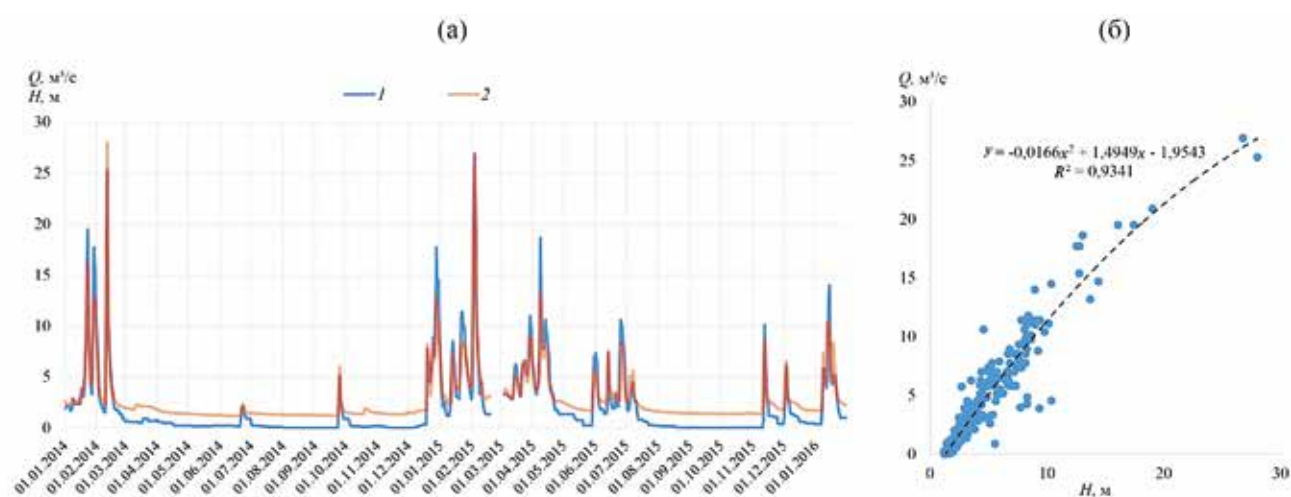


Рис. 8. Диаграммы, показывающие связь расхода Скульского источника (по ГП на р. Черной) с уровнями карстовых вод в Скульской пещере: а — динамика среднесуточных расходов на ГП р. Черной (1) и уровней в Скульской пещере (2) за 2014–2015 гг.; б — зависимость между среднесуточными расходами Q ($\text{м}^3/\text{с}$) р. Черной и уровнями воды H (м) в Скульской пещере.

гидрогеологической изученности Ай-Петринского массива позволили уточнить границы водосбора КВС Скульской пещеры. Выявлен северный Тарпанбаирский питающий участок, в результате чего общая площадь водосбора достигла 38 км². Установлена ключевая гидрогеологическая роль Карадагского сброса, ориентирующего подземный карстовый сток Тарпанбаирского и Карадагского участков в направлении Скульской пещеры.

Анализ физико-химических параметров вод в Западном и Восточном озерах Скульской пещеры позволил выявить их существенные различия, которые наиболее ярко проявляются в межпаводковые фазы и полностью исчезают в периоды мощных паводков, когда воды обоих водоемов объединяются. Выдвинуто предположение, что западное окончание пещеры получает питание из контуров Карадагского участка водосбора, а восточное — из Тарпанбаирского.

Достоверно установлена связь между КВС Скульской пещеры и КВС Скульского источника, вытекающего из пещеры Черной в соседнем гидрогеологическом блоке. Связь наиболее отчетливо проявляется в период паводков, когда при подъеме уровня воды в пещерных озерах возникает бифуркация с основным оттоком в сторону пещер Энтузиастов, Огненный грифон и Черной (Скульский источник) и второстепенным — предположительно в сторону пещеры Кирилловской (и далее в Байдарскую котловину).

Выявленные условия формирования подземного стока и закономерности пространственно-временного распределения режимных характеристик вод в водосборе Скульской пещеры могут послужить основой для создания разнообразных гидрогеологических моделей, разработки проектной документации по строительству гидротехнических сооружений и принятия управленческих решений по охране карстовых вод и их рациональному использованию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амеличев Г.Н. Обоснование заповедного статуса карстовых полостей Республики Крым на основе оценки спелеоресурсного потенциала // *Вопр. географии*. Сб. 147. Спелеология и карстоведение. М.: Изд. дом “Кодекс”, 2018. С. 363–387.
2. Вахрушев Б.А. Районирование карста Крымского полуострова // *Спелеология и карстология*. 2009. № 3. С. 9–46.
3. Головцын В.Н., Смольников Б.М., Дублянский В.Н., Иванов Б.Н. Применение геоэлектрических исследований к решению основных проблем карста Горного Крыма. Киев: Наукова думка, 1966. 150 с.
4. Дублянский В.Н. Карстовые пещеры и шахты Горного Крыма. Л.: Наука, 1977. 180 с.
5. Дублянский В.Н., Вахрушев Б.А., Климчук А.Б., Киселев В.Э. Крупные карстовые полости СССР. Т. II. Крымская спелеологическая провинция. К., 1987. 65 с.
6. Дублянский В.Н., Дублянская Г.Н. Карстоведение. Ч. 1. Общее карстоведение. Пермь, 2004. 308 с.
7. Дублянский В.Н., Кикнадзе Т.З. Гидрогеология карста альпийской складчатой области юга СССР. М.: Наука, 1984. 128 с.
8. Дублянский В.Н., Ломаев А.А. Карстовые пещеры Украины. Киев: Наук. думка, 1980. 180 с.
9. Дублянский В.Н., Шутов Ю.И., Приблуда В.Д. Индикаторные опыты в некоторых карстовых областях Альпийской складчатой зоны // *Изв. вузов. Геол. и разв.* 1975. № 5. С. 74–82.
10. Красная книга Севастополя. Калининград; Севастополь: РОСТ-ДОАФК, 2018. 432 с.
11. Приблуда В.Д., Коджаспиров А.А., Дублянский В.Н. Баланс подземных вод юго-западной части Горного Крыма // *Геол. журн.* Т. 39. Вып. 2. 1979. С. 38–46.
12. Самохин Г.В., Турбанов И.С. Пещера Скульская // *Атлас пещер России* / Гл. ред А.Л. Шелепин. М.: РГО, 2019. С. 230–233.
13. Токарев С.В., Амеличев Г.Н., Токарев И.В. Новые данные о гидрогеологических условиях западной части Ай-Петринского карстового массива (по результатам наблюдений паводка в феврале 2018 г.) // *Теория и практика современной карстологии и спелеологии. Материалы междунаrod. науч.-практ. конф. “III Крымские карстологические чтения”*. Симферополь, 2021. С. 80–87.
14. Чиганов И.А., Бакиевская В.А., Поздняков С.П. Модель формирования родникового стока в трещинно-карстовом бассейне на примере верховьев р. Черная // *Тр. Всерос. науч. конф. с Междунаrod. участием “Современная гидрогеология: актуальные вопросы науки, практики и образования”*. М.: МГУ, 2023. С. 131–137.

15. Bonacci O., Roje-Bonacci T. Water temperature and electrical conductivity as an indicator of karst aquifer: the case of Jadro Spring (Croatia) // *Carbonates and Evaporites*. 2023. V. 38. 55.
<https://doi.org/10.1007/s13146-023-00881-x>
16. COST Action 65 – Hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas. Final Rep. Brussels, Luxembourg: ECSC-EC-EAEC, 1995. 446 p.
17. Dublyansky Yu.V., Klimchouk A.B., Tokarev S.V., Amelichev G.N., Spötl C. Groundwater of the Crimean Peninsula: A first systematic study using stable isotopes // *Isotopes in Environ. Health Studies*. 2019. V. 55. Iss. 5. P. 419–437. DOI: 10.1080/10256016.2019.1650743
18. Fiorillo F., Pagnozzi M., Adesso R., Cafaro S., D'Angeli I.M., Esposito L., Leone G., Liso I.S., Parise M. Uncertainties in understanding groundwater flow and spring functioning in karst / Eds M.J. Currell, B.G. Katz // *Threats to Springs in a Changing World: Science and Policies for Protection*. 2023. P. 131–143.
<https://doi.org/10.1002/9781119818625.ch9>
19. Ford D., Williams P. Karst hydrogeology and geomorphology. Chichester: Wiley, 2007. 576 p.
20. Iacurto S., Grelle G., De Filippi F.M., Sappa G. Karst spring recharge areas and discharge relationship by oxygen-18 and deuterium isotopes analyses: a case study in Southern Latium Region, Italy // *Applied Sci*. 2020. V. 10. Iss. 5. 1882. DOI: 10.3390/app10051882
21. Marques T., Galvão P., Assunção P., Pandolf B., Marshall P., Paiva I. Natural responses of Neoproterozoic dynamic karst springs to rainfall events, São Miguel Watershed, Minas Gerais, Brazil // *Hydrol. Processes*. 2024. V. 38. Iss. 3. E15107. <https://doi.org/10.1002/hyp.15107>
22. Ravbar N., Engelhardt I., Goldscheider N. Anomalous behaviour of specific electrical conductivity at a karst spring induced by variable catchment boundaries: the case of the Podstenjšek spring, Slovenia // *Hydrol. Processes*. 2011. V. 25. Iss. 13. P. 2130–2140. DOI: 10.1002/hyp.7966
23. Stevanović Z. Karst waters in potable water supply: a global scale overview // *Environ. Earth Sci*. 2019. V. 78. № 662. P. 1–12. DOI: 10.1007/s12665-019-8670-9
24. Stroj A., Briški M., Oštrc M. Study of groundwater flow properties in a karst system by coupled analysis of diverse environmental tracers and discharge dynamics // *Water*. 2020. V. 12. Iss. 9. 2442. DOI: 10.3390/w12092442
25. Vakhrushev B.A., Amelichev G.N., Tokarev S.V., Samokhin G.V. The main problems of karst hydrogeology in the Crimean peninsula // *Water Resour*. 2022. V. 49. № 4. P. 595–604. DOI: 10.1134/S0097807822040182

FEATURES OF THE KARST WATER REGIME IN THE SKELSKAYA CAVE (AI-PETRY MASSIF, THE MOUNTAIN CRIMEA) AND THEIR HYDROGEOLOGICAL INTERPRETATION

S. V. Tokarev^{a, b, *}, G. N. Amelichev^{a, b}

^aV.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, 295007 Russia

^bWater Problems Institute, Moscow, 119333 Russia

*e-mail: tokcrimea@list.ru

The article is devoted to the analysis of long-term (2012–2023) monitoring data of hydrological (levels) and physico-chemical (temperature, specific electrical conductivity) characteristics of karst waters in the Skelskaya Cave. Parallel observations in opposite parts of the cave (Western and Eastern lakes) revealed synchronous fluctuations of levels, but different dynamics of temperature, specific conductivity and isotopic composition of waters. Differences in physico-chemical parameters are particularly strong during flood events, indicating that two streams of karst water from different catchment areas flow into the cave. The Karadagsky and Tarpanbairsky feeding areas, occupying different elevations and directing their waters along the Karadagsky fault toward the Western and Eastern lakes of the cave, respectively, were identified. Comparison of water level fluctuations in the cave with the dynamic of the Skelsky spring discharge, as well as physicochemical and isotopic characteristics during floods, allowed us to establish a confident connection between them. Thus, the Skelsky spring is the main discharge point (drain) of the Skelskaya cave karst aquifer system.

Keywords: karst aquifer system, recharge area, groundwater flow, physico-chemical regime, specific conductivity, flood, Ai-Petry massif

УДК 504.064.3

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДА ВОДЫ МАЛЫХ РЕК, ОСНОВАННЫЙ НА ОБРАБОТКЕ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ¹

© 2024 г. Д. А. Антоненков*

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011 Россия***e-mail: dmitry_science@mail.ru*

Поступила в редакцию 22.02.2024 г.

После доработки 15.03.2024 г.

Принята к публикации 20.03.2024 г.

Рассмотрен экспресс-метод определения расхода воды, основанный на вычислении поверхностной скорости течения с использованием PIV-метода. Показаны методика выполнения измерений и алгоритм работы программного обеспечения для обработки видеоизображений водного потока. Приведены результаты натурных исследований, выполненных с помощью разработанного метода, а также итоги сличения результатов, полученных с применением стандартных методик. Разработанный метод позволяет получать оперативные данные о расходе воды в реке или канале без наличия дорогостоящих средств измерения и специально подготовленного персонала. Благодаря определению поля скоростей течения по всему поперечному створу исследуемого водного объекта метод дает возможность получить более точные данные о расходе, чем стандартные средства измерения (гидрометрические вертушки, поплавковый метод), работы с которыми выполняются точно на определенных станциях. Полученные данные о расходе воды могут использоваться для научного обоснования работ при проектировании берегозащитных, русло-регулирующих морских и речных сооружений, а также экологической оценки состояния водного объекта при изучении проблемы загрязнения воды. Использование данного метода на действующих гидрологических постах позволит оперативно определять расход воды в реках в дистанционном режиме с применением соответствующего оборудования, что особенно актуально в Крыму для оценки пикового стока в периоды высоких паводков и половодий.

Ключевые слова: расход воды, расчет стока, скорость течения, PIV-метод, методы визуализации, обработка изображений.

DOI: 10.31857/S0321059624060057 **EDN:** VOZVGX

ВВЕДЕНИЕ

При разработке систем рационального управления водными ресурсами, проектировании различных гидротехнических сооружений, расчета количества воды для населенных пунктов и нужд производства необходимы точные, оперативные данные о расходе воды — основной гидрологической характеристики любого водотока [5].

Для устьевой области рек характерно наличие возвратно-поступательного движения водных потоков, направление которых может быстро изменяться во времени. Получение оперативных

данных о количестве воды, протекающее в единицу времени через определенное сечение в обоих направлениях (баланс воды), — одна из задач экологического мониторинга.

Также непрерывный мониторинг расхода воды малых рек может помочь оперативно определить наличие несанкционированного забора воды и образование заторов в устье реки. В частности, это актуально для рек Крыма при разработке мероприятий по предупреждению и предотвращению разливов рек и затоплению прилегающих территорий во время паводков.

Применяемые на сегодняшний день методы определения расхода воды недостаточно оперативны, а также применяются в основном на оборудованных гидрометрических постах [6], сеть которых ограничена. В связи с этим актуально создание новых методов, которые позволят получать оперативную и достоверную информацию

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания (тема FNNN-2024-0016 “Исследование пространственно-временной изменчивости океанологических процессов в береговой, прибрежной и шельфовых зонах Черного моря под воздействием природных и антропогенных факторов на основе контактных измерений и математического моделирования”, шифр “Прибрежные исследования”).

о расходе воды в реках с применением экономически эффективных и простых в использовании технологий.

Для определения расхода воды существуют различные методы [4]. Наиболее распространен метод “скорость—площадь” [2]. Расход определяют как произведение площади его поперечного сечения и средней скорости течения.

Для расчета площади поперечного сечения реки измеряют ширину реки и ее глубину на разных расстояниях от берега с использованием гидрометрических штанг, лотлиней, профилографов [9] и другого оборудования.

Скорость течения речного потока определяется на разной глубине и на разных расстояниях от берега по поперечному профилю, так как в разных точках сечения она неодинакова [3]. Для определения скорости течения используют в основном гидрометрические вертушки [11]. Вертушку опускают в реку на тросе или на штанге и проводят измерения на разных горизонтах: в основном на глубине 0.2h и 0.8h. При глубине потока до 0.5 м допускается измерять скорость потока в одной точке на расстоянии 0.4h от дна или 0.6h от поверхности воды. При проведении первичной градуировки гидропостов или при плановых поверках, где требуется высокая точность, измерения проводятся пятиточечным способом. Для оперативного определения скорости течения применяется поплавковый метод [1], суть которого заключается в определении времени прохождения поплавка между двумя створами выше и ниже по течению реки. Зная расстояние между ними, определяют поверхностную скорость течения и далее с использованием поправочных коэффициентов вычисляют среднюю скорость по глубине. Помимо указанных выше, применяют и другие методы, например — измерения скорости течения реки с помощью ультразвука [4]. Принцип его заключается в следующем: под водой устанавливают возбудитель ультразвуковых колебаний, ниже по течению на некотором расстоянии от него — приемник этих колебаний. Далее проводят измерения скорости прохождения ультразвука сначала по течению, затем против течения. По разнице времени прохождения ультразвуковых колебаний по течению

реки и против течения вычисляют скорость течения. Ультразвуковой метод позволяет измерять скорость течения с берега и определять расход воды с любой дискретностью, но в одной точке пространства, что снижает точность определения скорости по поперечному сечению.

Реже используют метод смешения или химический метод [7]. Он заключается в том, что в речной поток добавляют определенный объем солевого раствора с известной концентрацией, а ниже по течению, где раствор уже хорошо перемешан с речной водой, отбирают пробу воды и определяют в ней концентрацию соли. По отношению концентрации соли в исходном растворе к концентрации в реке ниже по течению, а также с учетом его объема вычисляют расход воды в реке.

Метод “скорость—площадь” — основной в настоящее время для определения расхода воды в реках, однако используемые способы измерения скорости течения не позволяют оперативно получать натурные данные и требуют значительных финансовых и трудовых затрат.

Основная цель данной работы — показать возможности разработанного метода определения расхода воды в реке, отличительная особенность которого — определение скорости течения при помощи обработки видеоизображений водной поверхности. Данный метод позволяет оперативно получать экспресс-данные о расходе воды в реке с минимальными финансовыми и трудовыми затратами. Большое преимущество также — возможность его применения в дистанционном режиме.

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Сущность метода заключается в получении видеоизображений водной поверхности реки с необходимого ракурса с учетом разбивки створа на местности и профиля глубин для данного створа. Далее полученные видеофайлы обрабатываются при помощи специализированного программного обеспечения, определяется поле поверхностных скоростей течения, площадь створа и вычисляется расход реки по методу “скорость—площадь”.

Методика предполагает последовательное выполнение ряда этапов работ.

Первый этап. Выбор экспериментального участка на местности, разбивка створа, промерные работы

Для гидроствора выбирается прямолинейный бесприточный участок без валунов и водной растительности, с квазиоднородным, расчищенным от завалов профилем дна. Назначаются промерные вертикали, зависящие от ширины реки, но ≥ 20 . При ширине объекта < 5 м число промерных вертикалей выбирается так, чтобы расстояние между ними было ≤ 0.25 м. Также на данном этапе выполняется измерение расстояний (рис. 1), которые требуются при последующей программной обработке видеофайлов. Для этого на местности размечаются четыре реперные точки (рис. 1) с использованием краски, колышков или других подручных материалов.

Эти данные позволяют построить матрицу преобразования для пересчета расстояний и размеров на полученных изображениях в реальные единицы измерения [13] (рис. 2).

Второй этап. Регистрация видеоизображений поверхностного слоя воды

Видеосъемка выполняется камерой либо смартфоном, обеспечивающим минимальное разрешение съемки 1920×1080 точек (пикселей) и частоту кадров ≥ 24 к/с. Выбирается угол съемки $\sim 45^\circ$, чтобы в кадре был отображен полностью размеченный участок реки с реперными

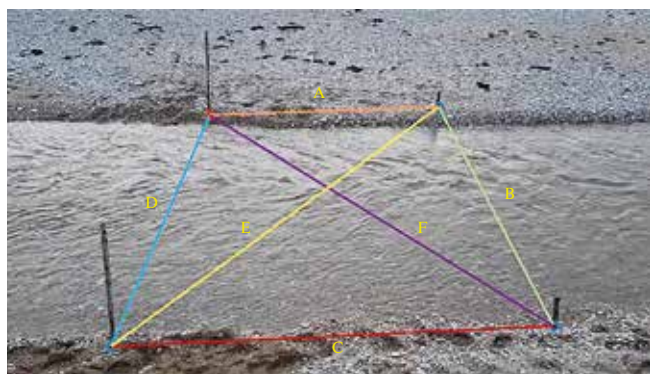


Рис. 1. Определение реперных расстояний на местности.

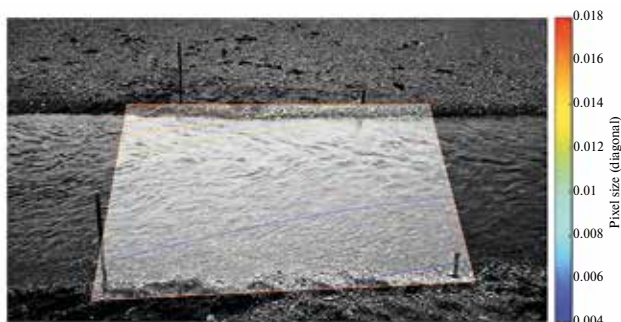


Рис. 2. Вычисление размера пикселя для исследуемой области.

ми точками. С учетом освещения место съемки выбирается так, чтобы колебания поверхности реки были визуально наиболее различимы (наилучшие результаты показала съемка против света). При слабом течении и в отсутствие видимых колебаний поверхности воды (когда поверхность “гладкая”) применяются маркеры, которые запускаются выше по течению по всей ширине створа.

Третий этап. Программная обработка видеоизображений с использованием программного обеспечения Matlab

Видеофайл разделяется на отдельные изображения, далее проводится их обработка для вычисления поля поверхностной скорости течения с помощью PIV-метода [12]. Данный метод основан на анализе смещения паттернов, представляющих собой неровности водной поверхности, за фиксированный интервал времени. Для определения скорости их смещения используется кросс-корреляция двух последовательных изображений, которые разделяются на фрагменты. Для каждого такого фрагмента рассчитывается кросс-корреляционная функция (1) и ищется ее максимум [10]:

$$C(m, n) = \sum_i \sum_j I_1(i, j) I_2(i + m, j + n), \quad (1)$$

$C(m, n)$ – величина кросс-корреляции для пикселя (m, n) ; $I_1(i, j)$ – яркость пикселя (i, j) первого фрагмента изображения; $I_2(i + m, j + n)$ – яркость пикселя $(i + m, j + n)$ второго фрагмента изображения.

По координатам максимума относительно центра фрагмента определяются направление

и величина смещения пикселей D ; далее, зная временную задержку между кадрами Δt , рассчитывают скорость течения [8]:

$$V = S \frac{D}{\Delta t}, \quad (2)$$

S – масштабный коэффициент для пересчета скорости пкс/с – м/с, который берется из матрицы преобразования.

Четвертый этап. Определение расхода воды по методу “площадь–скорость”

Расход воды Q в створе определяется как сумма расходов воды q_i между промерными вертикалями по формуле:

$$Q = \sum_{i=0}^n q_i, \quad q_i = k S_i v_i, \quad (3)$$

S_i – площадь поперечного сечения потока i -го участка, м²; v_i – поверхностная скорость течения для i -го участка, м/с. Для учета изменения скорости течения по глубине применяется коэффициент $k = 0.8$ [4], учитывающий шероховатость подстилающей поверхности.

Площадь S_i для участков в центральной части створа рассчитывается следующим образом:

$$S_i = \frac{(h_{k-1} + h_k) b_{k-1}}{2}, \quad (4)$$

у берегов вычисляется по формулам:

$$S_R = \frac{(h_0 + h_1) b_0}{2}, \quad S_L = \frac{h_k b_k}{2}, \quad (5)$$

где h – глубина на промерных вертикалях; b – расстояние между промерными вертикалями; b_0 и b_k – расстояния между крайними промерными вертикалями и урезами воды; k – номер промерной вертикали.

Апробация метода проходила при экспедиционных исследованиях на реках юго-западного Крыма: Черной, Бельбек, Каче – в течение 2020–2023 гг. Определение расхода воды в реках проводилось с использованием гидрометрической вертушки, поверхностных поплавков и разработанным методом видеорегистрации.



Рис. 3. Распределение скоростей потока р. Качи у гидропоста с. Суворово.

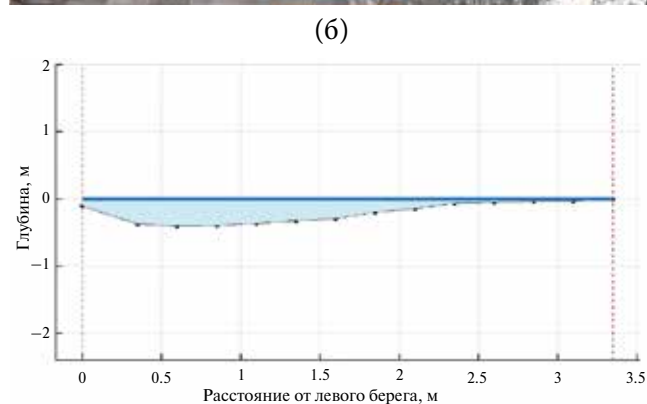
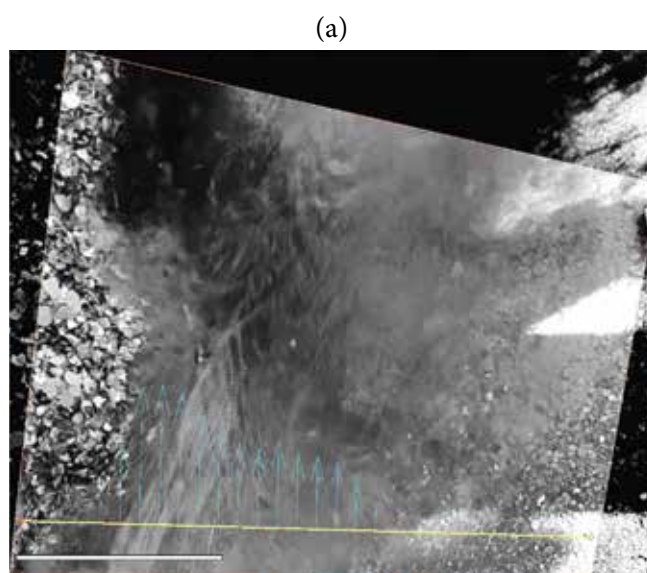


Рис. 4. Векторы средней скорости течения по каждому участку створа (а), профиль глубин (б) в створе р. Качи у с. Суворово.

Для примера на рис. 3 показано поле скоростей течения, построенное по результатам программной обработки видеоданных, полученных в ходе экспедиции в 2023 г.

Таблица 1. Расход воды, определенный разными методами

Метод измерения скорости потока	Расход воды, м³/с			
	р. Кача, у с. Суворово	р. Бельбек, у с. Фруктового	р. Бельбек, пляж	р. Черная, у с. Хмельницкого
Метод 1 (гидрометрической вертушкой)	0.25	0.42	0.55	1.25
Метод 2 (поверхностными поплавками)	0.30	0.49	0.42	2.09
Метод 3 (с помощью видеорегистрации)	0.27	0.37	0.48	1.29
Отклонение метода 3 от 1, %	8	11	12	3
Отклонение метода 2 от 1, %	20	17	23	67

На рис. 4 изображен размеченный створ, в котором проводились промерные работы. Выполнены расчеты средней скорости течения для каждого участка створа (рис. 4а), и построен профиль его глубин (рис. 4б). Определенный с помощью разработанного метода расход воды составил 0.27 м³/с, средняя скорость потока – 0.33 м/с.

Также в ходе данной экспедиции расход воды измерялся с помощью других методов с использованием гидрометрической вертушки и поверхностных поплавков. Сравнение результатов, полученных с помощью разных методов, показано в табл. 1. Разница результатов разработанного метода и стандартного, аттестованного метода с использованием гидрометрической вертушки – в среднем ≤12% – это хороший результат, он может свидетельствовать о работоспособности нового метода. При этом измерения, выполненные с использованием поверхностных поплавков, показали худшие результаты.

ВЫВОДЫ

Таким образом, разработанный метод позволяет получать оперативные натурные данные о расходе воды в реке без использования специализированного, дорогостоящего оборудования. Данный метод может быть технически реализован для дистанционного, непрерывного мониторинга расхода воды в малых реках Крыма для оценки пикового сброса в условиях паводков и половодий. Выполненная апробация метода показала его работоспособность, расхождения со стандартными применяемыми методами в целом были ≤12%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бебенина Т.П. Основы гидрометрии и гидрологии. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. 138 с.

2. Лучшева А.А. Практическая гидрометрия. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 424 с.

3. Макаревич А.А., Яротов А.Е. Речной сток и русловые процессы: пособие. Минск: БГУ, 2019. 115 с.

4. Методы измерения расхода воды на реках и каналах, в напорных трубопроводах насосных станций и оросительных систем. <http://cawater-info.net/library/rus/watlib/watlib-11-2015.pdf>. (дата обращения: 14.02.2024)

5. Миньковская Р.Я. Комплексные исследования разнотипных морских устьев рек (на примере морских устьев рек Северо-Западной части Черного моря). Севастополь: Морской гидрофизический ин-т РАН, 2020. 364 с. doi: 10.22449/978-5-6043409-2-9

6. Определение расхода воды методом смешения. https://ozlib.com/875808/tehnika/opredelenie_rashoda_vody_metodom_smesheniya#286 (дата обращения: 14.02.2024)

7. РД 52.10.842-2017. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 9. Гидрометеорологические наблюдения на морских станциях и постах. Ч. 1. Гидрологические наблюдения на береговых станциях и постах. М., 2017. 375 с.

8. Сергеев Д.А. Использование современных методов анемометрии по изображениям частиц (PIV-методов) при лабораторном моделировании геофизических течений // Вестн. Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4 (2). С. 522–524.

9. Слабожанин Г.Д. Гидрометрия: учебное пособие к самостоятельной работе по гидрологии по направлению подготовки бакалавров 270800 “Строительство”. Томск: Изд-во ТГАСУ, 2014. 58 с.

10. Хмелевой С.В. Использование GPU для расчетов скоростей газо-жидкостных сред с помощью метода PIV // Радиоэлектронные и компьютерные системы. 2012. № 6 (58). С. 124–129.
11. Dykman V.Z. Technical tools for studying structure and dynamics of water masses// Phys. Oceanogr. 2016. № 6 (192). P. 43–55.
doi: 10.22449/1573-160X-2016-6-43-55
12. Jahanmiri M. Particle Image Velocimetry: Fundamentals and Its Applications. Research Rep. 2011:03. Göteborg, Sweden: Department of applied mechanics, Chalmers Univ. Technol., 2011. 58 p.
13. Patalano A., García C.M., Rodríguez A. Rectification of Image Velocity Results (RIVeR): A simple and user-friendly toolbox for large scale water surface Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV) // Computers Geosci. V. 109. December 2017. P. 323–330.

A METHOD FOR DETERMINING THE WATER DISCHARGE OF SMALL RIVERS BASED ON WATER SURFACE VIDEO IMAGES PROCESSING

D. A. Antonenkov

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, 299011 Russian Federation

e-mail: dmitry_science@mail.ru

An express method for determining water discharge based on calculating the surface flow velocity using the PIV method is considered. The method of performing measurements and the software operation algorithm for video images processing of a water stream are shown. The results of field studies performed using the developed method are presented, as well as the collation results obtained using standard techniques. The developed method makes it possible to obtain operational data on the water discharge data in a river or canal without expensive measuring instruments and specially trained personnel. Due to the determination of the flow velocity field along the entire transverse alignment of the studied water body, the method makes it possible to obtain more accurate water discharge data than standard measuring instruments (hydrometric turntables, float method), which are operated point-by-point at certain stations. The obtained data on water discharge can be used for scientific justification of work in the design of coastal protection, channel-regulating marine and river structures, as well as environmental assessment of the water body condition when studying the problem of water pollution. The use of this method at existing hydrological stations will make it possible to quickly determine the water discharge in rivers remotely using appropriate equipment, which is especially important in Crimea to assess peak runoff during the periods of high-water and floods.

Keywords: water discharge, calculation of river flow, flow velocity, PIV method, visualization methods, image processing

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 перспективно применение 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-

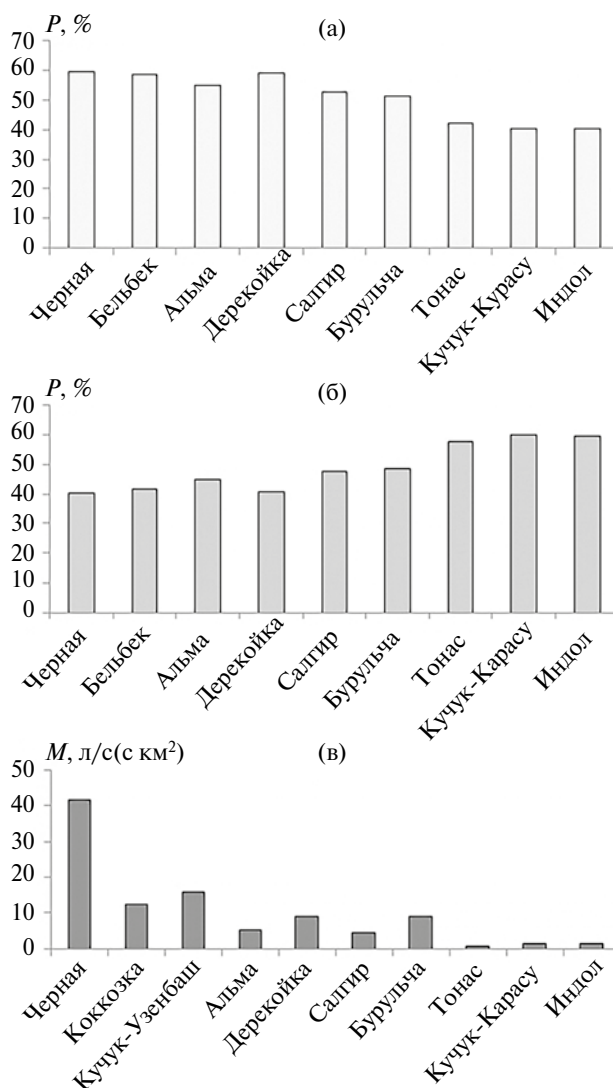


Рис. 1. Доля осадков P в течение периодов с ноября по апрель (а) и с мая по октябрь (б), оцененные для исследуемых речных бассейнов за период 2006–2020 гг., среднегодовой модуль стока M рек Крыма в исследуемых створах, оцененные за период 2014–2020 гг. (в).

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

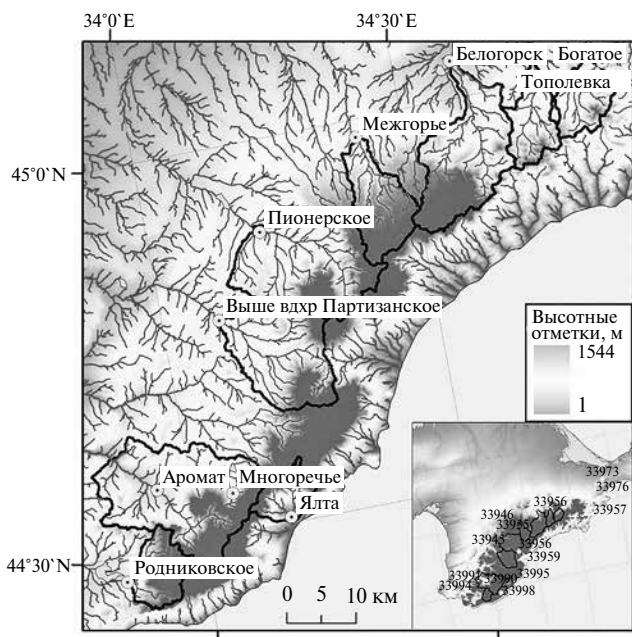


Рис. 2. Гидрометрические посты, по которым данные о среднесуточных расходах использованы при моделировании формирования стока исследуемых рек Крыма: р. Черная – с. Родниковское, р. Альма – выше водохранилища Партизанского, р. Дерекойка – г. Ялта, р. Салгир – с. Пионерское, р. Бурульча – с. Межгорье, 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, Бурлучи 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 метеоэлементов 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

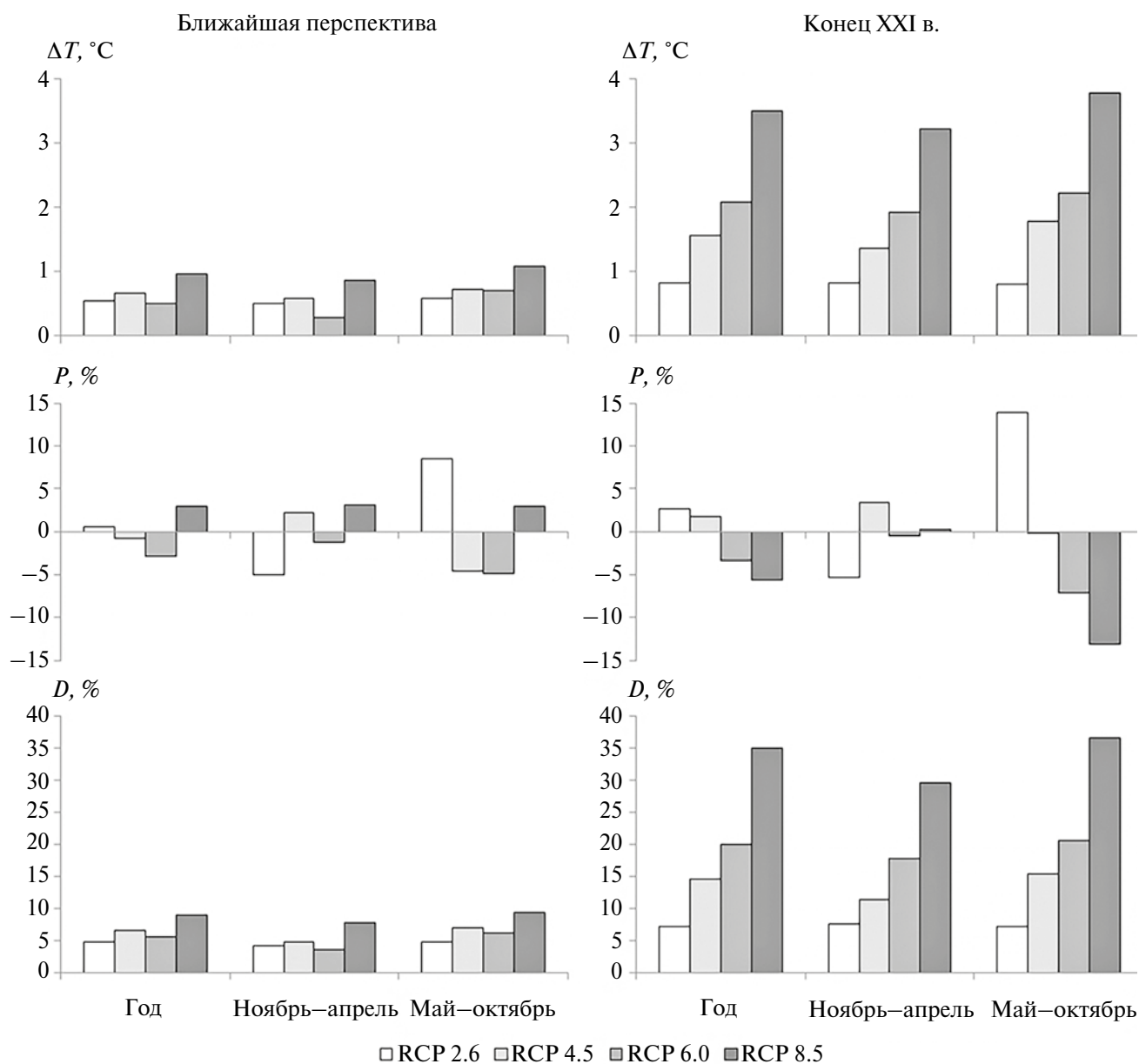


Рис. 3. Аномалии годовых и сезонных величин температуры воздуха, осадков и дефицита влажности воздуха для горной территории Крыма в XXI в. согласно данным GCMs при реализации разных RCP-сценариев на период ближайшей перспективы (слева) и на конец XXI в. (справа) относительно базового периода 2006–2020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

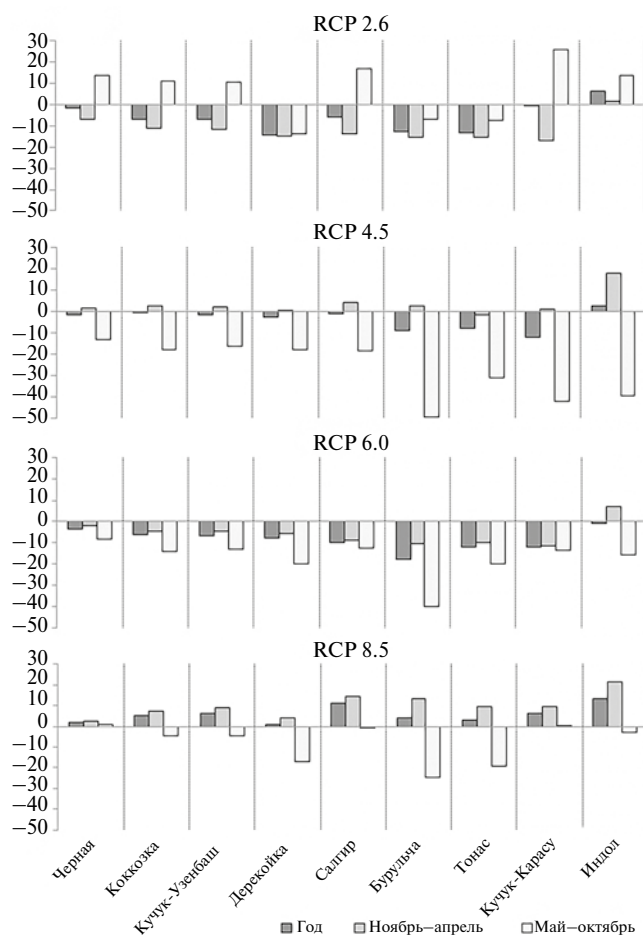


Рис. 4. Аномалии годовых и сезонных величин стока рек горного Крыма согласно результатам гидрологического моделирования на основе данных GCMs при сценариях RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5 на период ближайшей перспективы.

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, Коккозки, 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.,

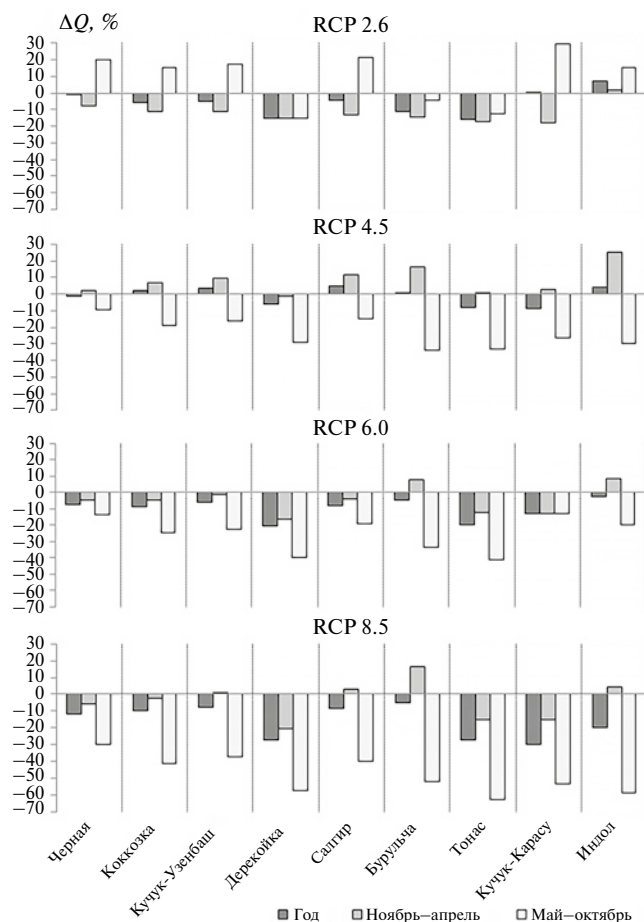


Рис. 5. Аномалии годовых и сезонных величин стока рек горного Крыма согласно результатам гидрологического моделирования на основе данных GCMs при сценариях RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5 в конце XXI в.

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. Землянскова А.А., Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Федорова А.Д. Моделирование формирования стока горной реки Деревойки (полуостров Крым) // Сб. докл. междунаrod. 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

УДК 556.3

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ XXI В. НА БАЛАНС ПОДЗЕМНЫХ ВОД ЮГО-ЗАПАДНОГО КРЫМА¹

©2024 г. В. Н. Самарцев^а, И. А. Чиганов^{а, *}, С. О. Гриневский^а, С. П. Поздняков^а,
Я. В. Сорокоумова^а, В. А. Бакшевская^б

^аМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

^бИнститут водных проблем РАН, Ивановская научно-исследовательская станция, Конаково Тверской обл., 171251 Россия

*e-mail: ilya-chiganov@mail.ru

Поступила в редакцию 17.04.2024 г.

После доработки 20.05.2024 г.

Принята к публикации 21.05.2024 г.

Разработана и откалибрована на современный период региональная геофильтрационная модель юго-западного Крыма в пределах Альминского артезианского бассейна и прилегающей к нему области трещинно-карстовых подземных вод Горного Крыма. На основе численных экспериментов с этой моделью оценены изменения ресурсов подземных вод под влиянием ожидаемых в XXI в. климатических изменений. Для этого для выбранного района исследования построены прогнозные карты инфильтрационного питания. Прогнозные карты инфильтрационного питания строились для равнинной части исследуемой области с помощью моделирования инфильтрационного водообмена. Для горной части в прогнозе изменения питания учитывались не только инфильтрационный водообмен, но и инфлюация – поглощение осадков поверхностными формами карста. В качестве прогнозного использован экстремальный сценарий изменения климата SSP5-8.5, предусматривающий максимальное потепление и ансамбль моделей общей циркуляции атмосферы и океана семейства CMPI 5. Из ансамблевого прогноза выбраны три наиболее контрастные по изменению индекса увлаженности модели, и для них получены прогнозные карты изменения питания в XXI в., использованные затем в численных экспериментах. Прогнозное инфильтрационное питание заметно отличается от современной величины – 366.4 тыс. м³/сут: при “сухом” климате инфильтрационное питание составляет 187.9 тыс., при “среднем” – 283.6 тыс., при “влажном” – 403.3 тыс. м³/сут. Результаты прогнозного моделирования баланса подземных вод в течение XXI в. при использовании этих карт инфильтрационного питания показали высокую адаптационную роль емкостных запасов и сокращения минимального речного стока на исследуемом масштабе времени порядка ста лет при сохранении сложившегося водоотбора подземных вод.

Ключевые слова: геофильтрационная модель, калибровка, баланс подземных вод, изменение климата, карта инфильтрационного питания, даунскейлинг, прогноз.

DOI: 10.31857/S0321059624060079 EDN: VOYXJV

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемые в последние десятилетия климатические трансформации в той или иной степени отражаются как на общей структуре водного баланса суши, так и на его отдельных компонентах, в том числе на речном и подземном стоке [1, 9]. Фундаментальная научная задача современных исследований – переход от фиксации глобальных климатических изменений к оценке масштабов их проявления на региональном уровне [13] и выполнению прогнозных оценок на основе сценарного подхода [17].

Такие прогнозные оценки следует проводить для адаптации к климатическим изменениям устойчивого использования подземных вод, питание которых осуществляется в основном за счет инфильтрации атмосферных осадков [15].

В настоящее время сложившийся научно-обоснованный подход – использование сценарного подхода к прогнозу изменения климата. Суть этого подхода состоит в том, что для выбранного сценария выброса парниковых газов используется ансамбль прогнозных моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), позволяющий спрогнозировать осадки и температуру на заданный период времени для всей поверхности Земли. Далее результаты даунскейлинга

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема FMWZ-2021-0001, номер государственной регистрации 121040700170-9).

этих прогнозов могут быть применены в гидрологических и гидрогеологических моделях для прогноза изменения баланса поверхностных и подземных вод конкретных регионов.

Инфильтрационное питание — основная приходная часть баланса подземных вод. Процессы трансформации атмосферных осадков на поверхности земли и в почве, определяющие среднюю величину и динамику инфильтрационного питания, напрямую зависят от климатических условий в данный период времени. Поэтому изменение климатических условий может привести к изменению питания подземных вод и, как следствие, — к изменению их естественных ресурсов [14, 15]. Эта проблема весьма актуальна для Крымского п-ова, являющегося в гидрогеологическом отношении балансово-замкнутым регионом, в котором все ресурсы поверхностных и подземных вод формируются за счет осадков. Особенности геологического строения, высотная зональность и связанная с ней изменчивость коэффициента увлажнения, а также различные ландшафтные условия обуславливают существенную площадную изменчивость питания подземных вод полуострова. По существующим оценкам, интенсивность питания меняется от 200—500 мм/год в Горном Крыму [5, 6] до практически нулевых значений в северной части равнинного Крыма [11].

Цель настоящей работы — оценка возможных изменений ресурсов подземных вод юго-западного Крыма в течение XXI в. при реализации неблагоприятного сценария климатических изменений.

Для достижения указанной цели разработана геофильтрационная модель юго-западной части Крымского п-ова, отражающая плановую изменчивость питания подземных вод, их взаимосвязи с поверхностными водами и сложившийся к настоящему времени эксплуатационный водоотбор. С использованием экстремальных прогнозных климатических сценариев выполнены оценки изменения питания подземных вод на исследуемой территории в течение XXI в. Далее эти оценки инкорпорированы в разработанную геофильтрационную модель, на которой выполнены численные эксперименты по изучению

климатических преобразований динамики режима и баланса подземных вод.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Гидрогеологические условия Крымского п-ова и его юго-западной части изучены достаточно хорошо. Так, с начала второй половины 1940-х до второй половины 1960-х гг. на всей территории Крыма проводились комплексные геологические и гидрогеологические съемки, результатом которых стала карта основных водоносных горизонтов масштаба 1 : 750 000 (1963 г.) по листам L-(36), (37) [7]. С 1965-х до начала 1990-х гг. выполнялись работы по построению гидрогеологических карт масштаба 1 : 200 000.

С 2000 по 2006 г. была проведена оценка прогнозных ресурсов и эксплуатационных запасов подземных вод с построением гидрогеологических карт основных водоносных горизонтов.

После 2014 г. увеличился водоотбор из подземных вод, в связи с чем в период с 2016 по 2020 г. предприятием “Крымгеология” были выполнены работы по оценке современного состояния месторождений питьевых и технических подземных вод нераспределенного фонда недр с целью приведения их запасов в соответствие с действующим законодательством на территории Республики Крым.

В 2018 г. были проведены работы по созданию гидрогеологических карт, авторских вариантов комплектов гидрогеологических карт масштаба 1 : 1 000 000 листов Р-35, N-42, М-44, I-36 с клапаном L-37, Р-39 и комплекта предварительных гидрогеологических карт масштаба 1 : 1 000 000 к листу Q-39.

С 2021 г. проводилось геологическое изучение недр в целях выявления новых месторождений питьевых подземных вод, в результате было увеличено количество эксплуатационных запасов на крупных водозаборных сооружениях, которые в основном расположены в юго-западной части Крымского п-ова. Также выполнялись работы по оценке ресурсного потенциала подземных вод

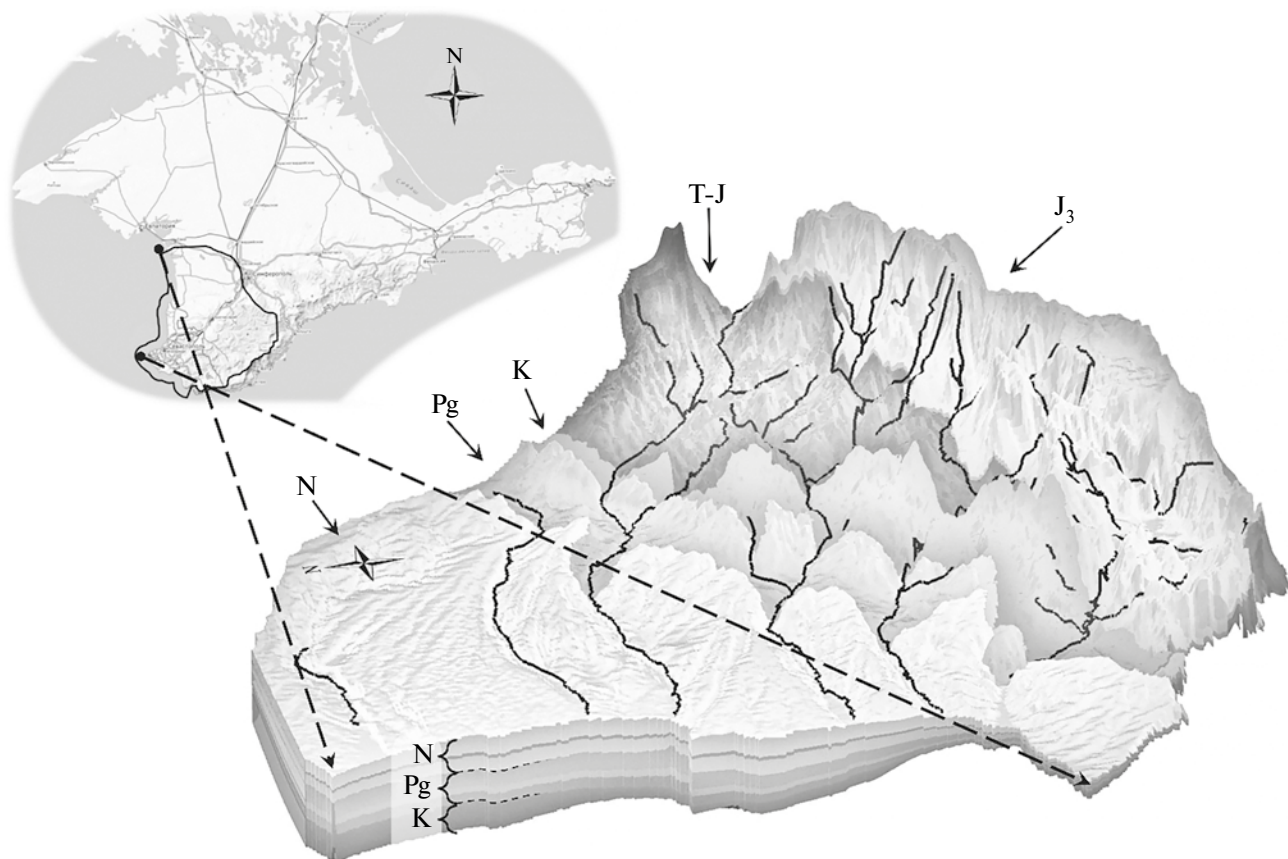


Рис. 1. Картохема территории расположения и геологического строения изучаемой территории.

территории и обеспеченности населения ресурсами подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения, разработки рекомендаций по рациональному использованию ресурсной базы питьевых и технических подземных вод.

Район исследований расположен в юго-западной части Крымского п-ова и включает в себя Альминскую впадину и прилегающую область Горного Крыма (рис. 1).

На этой территории расположены бассейны рек северо-западного склона Крымских гор: Черной, Бельбека, Качи, Альмы и Западного Булганака. В гидрогеологическом отношении рассматриваемая территория относится к Альминскому артезианскому бассейну (ААБ) и Крымской сложной гидрогеологической складчатой области (СГСО) [7], в которой формируется поверхностный сток упомянутых рек и инфильтрационное питание трещинно-карстовых подземных вод. В целом, эту территорию можно рассматривать как балансово-замкнутый бассейн стока поверх-

ностных и подземных вод — от водораздела, расположенного на Главной гряде Крымских гор, на юго-востоке до Черного моря на юго-западе и западе репрезентативного бассейна (рис. 1). Поток подземных вод, сформированный в пределах Главной гряды, движется по основному направлению главных рек в сторону Черного моря, частично разгружаясь в речную сеть [4, 10].

По условиям формирования подземных вод в исследуемом районе можно выделить следующие зоны в направлении от СГСО через ААБ к морю:

- область питания и формирования потока трещинно-карстовых подземных вод;
- область частичной разгрузки подземных вод в виде многочисленных родников;
- область преимущественно транзита подруслового потока подземных вод;
- область транзитного потока и частичной разгрузки в речную сеть в пластовой системе ААБ;
- область субмаринной разгрузки.

Область питания и формирования потока трещинно-карстовых подземных вод приурочена к Главной гряде Крымских гор, характеризующейся большим количеством осадков и малым испарением [6]. Питание подземных вод проходит за счет рассредоточенной инфильтрации и сосредоточенной инфильтрации через поверхностные карстовые формы. Область формирования родникового стока приурочена к контакту верхнеюрских пород с отложениями среднеюрского возраста или с отложениями таврической серии. Вторая и третья гряды Крымских гор, сложенные терригенно-карбонатными породами неогенового, палеогенового и мелового возраста [7], формируют систему межпластовых водоносных горизонтов ААБ.

Помимо разгрузки подземных вод в гидросеть, для Крымского п-ова в целом и для ААБ в частности важная часть расходных статей баланса – субмаринная разгрузка [12]. Эксплуатация подземных вод централизованными и децентрализованными водозаборами вблизи морского побережья приводит к перехвату естественной разгрузки подземных вод и привлечению речного стока на отдельных эксплуатируемых месторождениях [3], а также к развитию интрузии морских вод.

Для построения карты инфильтрационного питания на современный период рассматриваемая территория была разделена по типу рельефа на высокогорную и равнинную (предгорную) области по изолинии 400 м, которая достаточно хорошо коррелирует с границей распространения юрских известняков и пород таврической серии – со слоистой относительно полого залегающей толщей меловых в горной части и более молодых отложений в равнинной (рис. 1).

Для предгорной и равнинной частей территории применима схема “диффузионной”, относительно равномерной на элементарной площади инфильтрации. Для этой части исследуемой территории использовалась методика оценки питания подземных вод на основе геогидрологического моделирования [2]. Для построения карты питания проведено районирование территории по комплексу метеорологических (климатических), ландшафтных и гидрогеологических

факторов, в совокупности определяющих неоднородность условий формирования питания с выделением элементарных площадей $>0.2 \text{ км}^2$. В результате этого районирования выделено 225 сочетаний ландшафтных условий, для которых проведено моделирование формирования инфильтрационного питания подземных вод. По результатам этого моделирования построена карта среднемноголетнего инфильтрационного питания предгорной и равнинной частей территории, отвечающая современным климатическим условиям [11].

В высокогорной части территории формирование инфильтрационного питания имеет локально-инфилюационный характер в связи с интенсивным развитием поверхностного карста в юрских известняках, неравномерной трещиноватостью пород таврической серии и сильной расчлененностью рельефа, что определяет невозможность использования геогидрологического моделирования для оценки инфильтрации. Для оценки питания в этой части выделены площади плато и склонов. Затем с использованием высоко разрешимой базы данных “Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration” [21] на основе водно-энергетического подхода М.И. Будыко было рассчитано, что в области горных склонов и плато балансово-допустимые величины суммарного стока меняются в среднем от 100 до 500 мм/год. Эти величины согласуются, в целом, с характеристиками стока верховьев рек, протекающих на исследуемой территории [4], и с результатами экспериментальных водно-балансовых исследований на закарстованных плато Ай-Петринской яйлы [6] и геофильтрационного моделирования подземных вод юго-западной части Горного Крыма [12]. Начальные величины инфильтрационного питания для склонов приняты в диапазоне 30–70, для плато – 150–500 мм/год. Затем инфильтрационное питание в этих зонах уточнялось в ходе калибровки модели. Ай-Петринский массив – основная область питания трещинно-карстовых подземных вод юго-западной части Горного Крыма. По результатам индикаторных экспериментов, существенный поток трещинно-карстовых подземных вод направлен к северо-западу к Байдарской котловине, на контуре которой он частично разгружается через Скульский источник (один из крупнейших

источников Крымского п-ова и крупнейший карстовый источник Ай-Петринского массива) и в подрусловые отложения р. Черной (с. Родниковское), а другая часть потока разгружается в Черное море в районе мысов Форос и Айя и в Балаклавской бухте [8]. Таким образом, Скульский источник — центр частичной разгрузки трещинно-карстовых подземных вод в изучаемом районе, поэтому его можно считать репрезентативным для юго-западной части Горного Крыма и данные по его расходам можно использовать для характеристики подземного стока и для калибровки модели. В результате построена карта современного среднегодовоего питания для всей исследуемой территории. Суммарная величина инфильтрационного питания, полученная на ее основе, составила 264.2 тыс. м³/сут с допустимым интервалом варьирования от 174.5 до 349.8 тыс. м³/сут.

РАЗРАБОТКА И КАЛИБРОВКА
ГЕОФИЛЬТРАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Для исследуемого бассейна стока в интерфейсе ModelMuse [20] для программы Modflow 6 [16] разработана численная геофильтрационная модель, описывающая среднегодовое состояние подземных вод и среднемеженное состояние поверхностных водотоков. Модель имеет планово-пространственную структуру и включает в себя десять расчетных слоев, соответствующих основным водоносным горизонтам и комплексам (табл. 1). Непроницаемые плановые границы модели заданы по линиям поверхностных водоразделов (рис. 1), и эти границы, в целом, со-

впадают с принятыми границами артезианских бассейнов Крыма [7]. В область моделирования включена пятикилометровая зона потенциальной субмаринной разгрузки вдоль побережья Черного моря. Взаимодействие подземных вод с морем задано в первом модельном слое граничным условием 3-го рода с помощью модуля GHB (“General Head Boundary”) [16]. В модели учтены выклинивание и ограниченное распространение выделенных горизонтов, за счет чего на разных участках дна моря выходят отложения разного возраста — от неогеновых до юрских. В соответствии с этим море как граничное условие потока подземных вод задано в самый верхний активный расчетный слой (от 1 до 10) в каждом узле численной сетки.

Внутреннее граничное условие (сток), характеризующее современную эксплуатацию подземных вод, реализовано на модели в виде 214 действующих водозаборов, дебит которых задан по фактическому среднегодовому водоотбору за 2020 г., в сумме составившему 127.7 тыс. м³/сут.

Поскольку моделируется ограниченная область с большим количеством водозаборов, есть возможность выделить естественные границы потока. Северная граница области моделирования проходит приблизительно от Евпатории до Симферополя. Один из крупных водозаборов (Ивановский-1 с водоотбором >30 000 м³/сут) расположен очень близко к границе расчетной области. Расширение расчетной области было признано нецелесообразным, поскольку повлекло бы за собой включение других водозаборов

Таблица 1. Вертикальная дискретизация модели (в.г. — водоносный горизонт)

Номер слоя	Название горизонта	Проводимость или коэффициент фильтрации
-	Аллювиальные отложения аQ	5 м/сут
1	Серравальско-мессинский в.г. ($N_{1, srv-mes}$)	200 м²/сут
2	Серравальский водоупорный горизонт ($N_{1, srv}$)	0.0001 м/сут
3	Бурдигальско-серравальский водоупорный ($N_{1, bur-srv}$)	100 м²/сут
4	Бартон-бурдигальский водоупорный ($P_2b - N_{1, bur}$)	0.0001 м/сут
5	Лютетско-бартонский в.г. (P_2l-b)	100 м²/сут
6	Танет-ипрский водоупорный ($P_{1t} - P_{2i}$)	0.001 м²/сут
7	Сеноман-зеландский в.г. ($K_{2s} - P_{3sl}$)	100 м²/сут
8	Апт-альбский водоупорный (K_{1a-al})	0.001 м/сут
9	Валанжин-барремский в.г. (K_{1v-br}) и верхнеюрский в.г. (J_3)	100 м²/сут
10	Мезозойская зона экзогенной трещиноватости MZ	1 м/сут

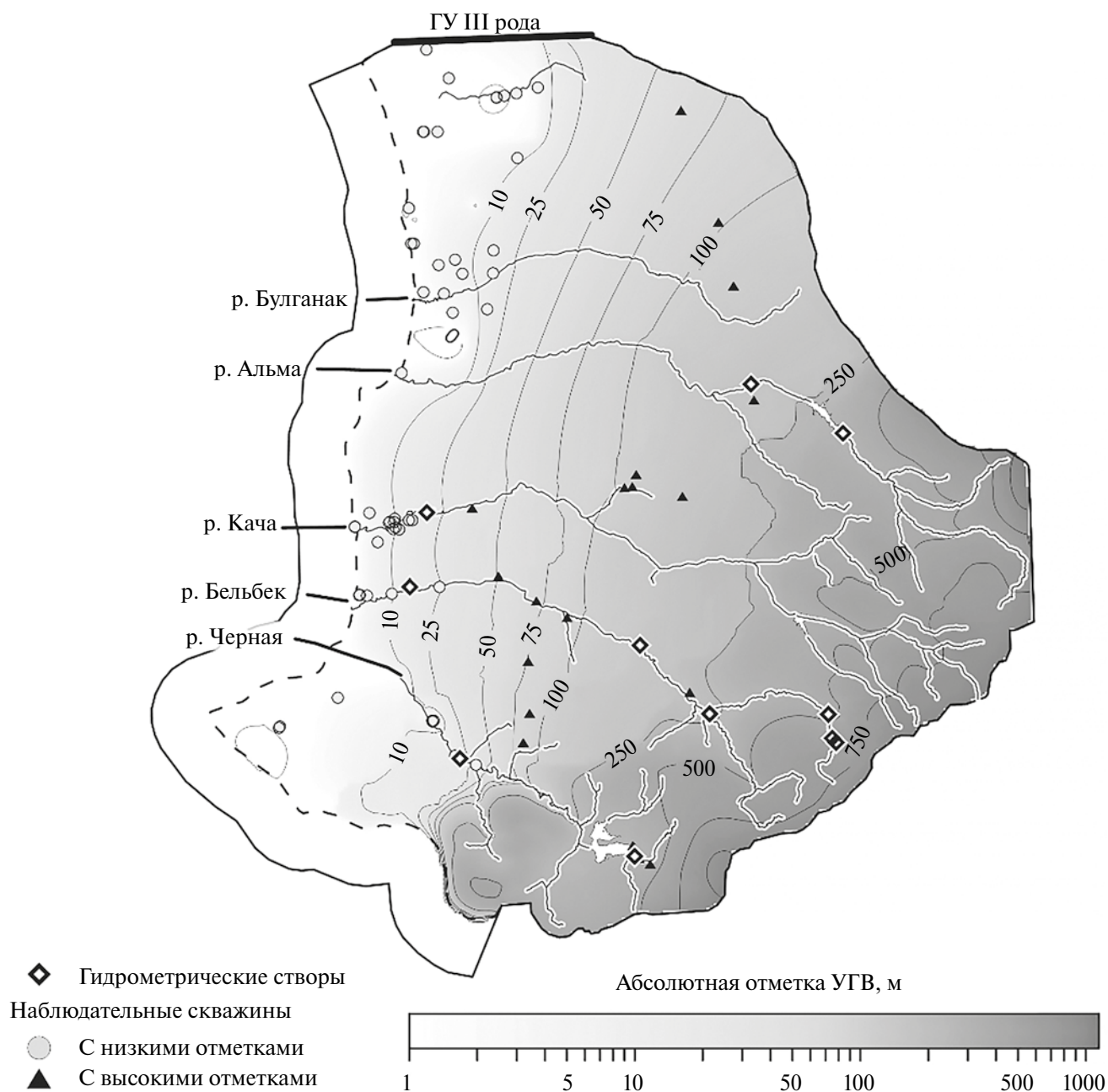


Рис. 2. Расположение точек наблюдения.

с возникновением аналогичных проблем. Для моделирования фактического притока с севера из-за пределов моделируемой области вдоль северной границы задана граница III рода (рис. 2) с помощью модуля GHB. Уровни на этой границе заданы равными естественным, сопротивление подбиралось при калибровке.

Инфильтрационное питание задается в каждом плановом узле численной сетки на суше

в верхний активный слой модели с помощью модуля RCH ("Recharge"). Для учета взаимосвязи подземных вод с реками речная сеть моделируется с помощью модуля SFR ("Stream Flow Routing") [17]. Этот модуль позволяет рассчитывать изменение расхода воды и связанное с этим изменение уровня воды в русле вплоть до полного пересыхания реки в зависимости от ее подземного питания. В пределах области моделирования выделено 5 бассейнов стока — это

бассейны рек Черной, Бельбек, Качи и Альмы, а пятый бассейн стока — северный, в его пределах находятся существовавшие ранее реки (Булганак и Тобе-Чокрак), которые к настоящему моменту не имеют постоянного круглогодичного стока. Эти 5 крупных бассейнов разделены, в общей сложности, на 68 малых бассейнов. В пределах каждого малого бассейна выделен соответствующий сегмент речной сети, связанный с другими сегментами выше и ниже по течению, применяемый модуль SFR обеспечивает передачу воды между сегментами с учетом направления потока и заданных при разработке модели связей.

Для моделирования использована неструктурированная сетка с базовой дискретизацией 400×400 м со сгущением методом дерева квадратов в долинах рек. Для учета родниковой разгрузки при региональном характере модели вместо указания родников как фиксированных точек разгрузки в верхнем активном слое всей

модели задано граничное условия типа дрены с помощью модуля “Drain” [16] с отметкой дренирования, равной отметке рельефа. Дрена задана в самые верхние активные ячейки по всей модельной сетке, что позволяет моделировать формирование родниковой разгрузки на участках локального превышения уровня подземных вод над уровнем земли. Для соблюдения общего водного баланса без потерь этой родниковой разгрузки используется модуль “Water Mover” [16], который позволяет моделировать передачу определенного расхода воды от одного граничного условия к другому. Для этого вся модель разделена на отдельные малые водосборные бассейны по поверхностным водоразделам, и суммарный расход родниковой разгрузки в границах водосбора передается в соответствующий сегмент речной сети. Таким образом, родниковая разгрузка остается в общем водном балансе моделируемого бассейна стока.

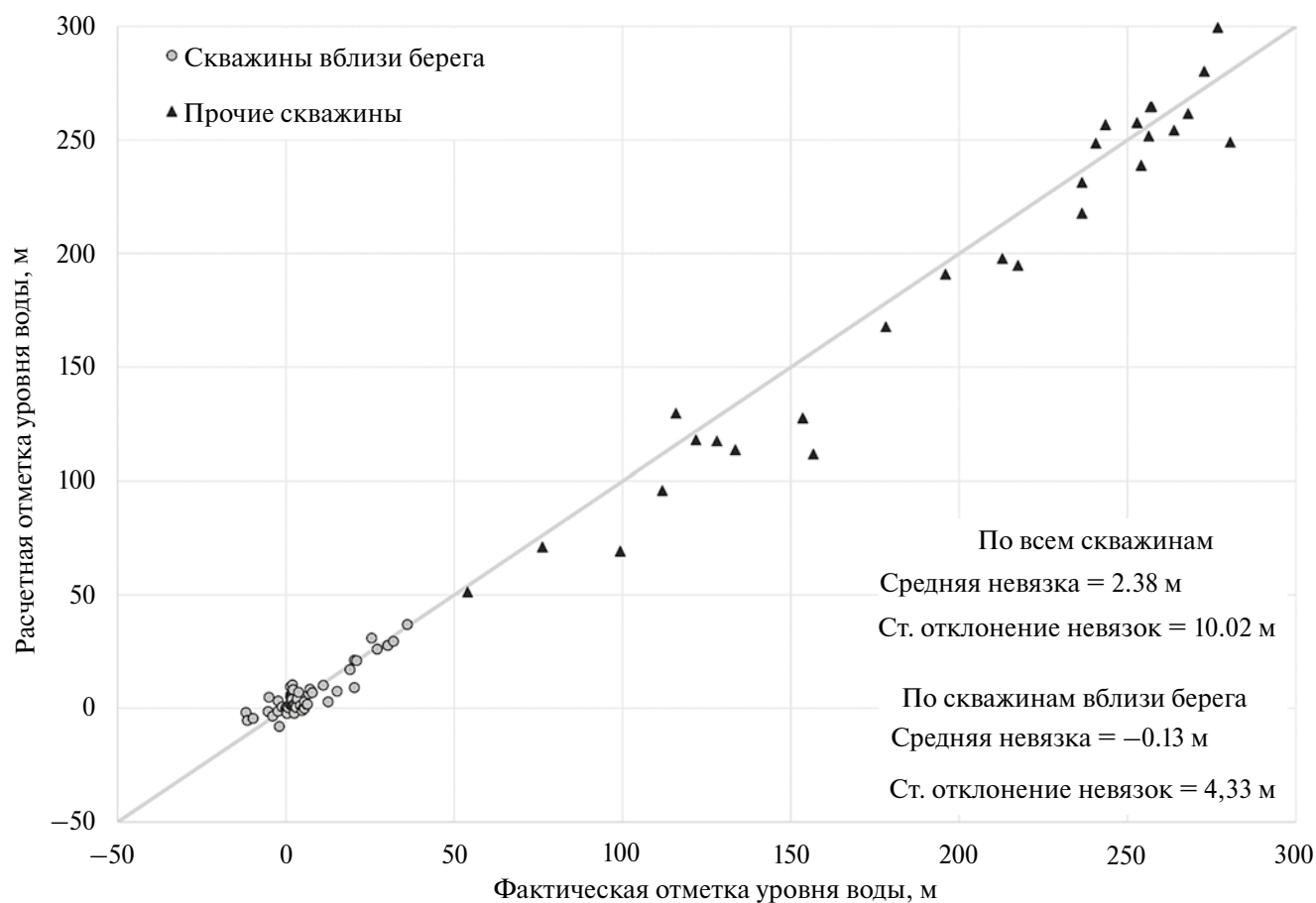


Рис. 3. Сопоставление расчетных и фактических уровней подземных вод.

Для калибровки модели выбраны следующие параметры:

- проводимость серравальско-мессинского водоносного горизонта (первый слой);
- проводимости других водоносных горизонтов на участках их выхода на поверхность;
- инфильтрационное питание, разделенное на зоны; в каждом из пяти крупных речных бассейнов калибруется отдельно питание на плато и отдельно – питание на склонах; инфильтрационное питание в равнинной части рассматриваемой территории не калибруется, поскольку принимается достаточно обоснованным в ходе геогидрологического моделирования.

В процессе калибровки модели использовались два типа данных – результаты режимных наблюдений за уровнями подземных вод по 82 скважинам и режимные наблюдения за расходами рек по 11 гидрометрическим створам, расположение которых показано на рис. 2.

Результаты калибровки модели по уровням подземных вод показаны на рис. 3. Из рис. 3 следует, что невязки модельных и фактических напоров по скважинам можно разделить на две группы. К первой группе невязок относятся скважины, расположенные в равнинной части, которые вскрывают преимущественно серравальско-мессинский горизонт (1 слой). Абсолютные отметки в них находятся в пределах 20 м над уровнем моря. Для этой группы скважин средняя невязка составляет -0.2 м, стандартное отклонение – 4.33 м. Вторую группу невязок

образуют наблюдательные скважины, расположенные в горной части. Для горной части характерны большие значения напорного градиента, невязки между фактическими и расчетными уровнями существенно больше. Средняя невязка составляет $+6.05$ м, стандартное отклонение – 15.2 м.

Сопоставление модельных и фактических среднемеженных расходов рек после калибровки модели показывает, что невязка расходов по 8 из 11 контрольных створов $\leq 25\%$ (табл. 2) и может считаться удовлетворительной с учетом надежности величин ненарушенного меженного стока.

В ходе калибровки был увеличен суммарный расход инфильтрационного питания до 324.6 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$, что приближено к его верхнему пределу – 349.8 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$, полученному при построении карты питания. Уточненная в процессе калибровки геоинфильтрационной модели карта инфильтрационного питания подземных вод для исследуемого бассейна стока показана на рис. 4, и по ней видно, что максимальное увеличение расхода инфильтрационного питания на 42 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$ приурочено к бассейну р. Черной. При этом в наиболее высокогорной закарстованной части бассейна расчетная величина питания достигла 250 мм в год. Эта величина питания не выходит за рамки полученных ранее оценок [6] и оценок с использованием водно-энергетического подхода М.М. Будыко. Кроме того, увеличение питания в этой области, возможно, отражает то, что подземный водосборный бассейн

Таблица 2. Сравнение фактических и расчетных среднемеженных расходов рек

Расположение створа	Расход, $\text{м}^3/\text{сут}$		Невязка, %
	Фактический	Модельный	
р. Кача – с. Суворово	37 900	36 700	-3
р. Бельбек – с. Куйбышево	40 900	47 700	14
р. Бельбек – с. Фруктовое	44 800	43 600	-3
р. Биюк-Узенбаш – с. Счастливое	7 200	9 300	23
р. Кучук-Узенбаш – с. Многогоречье	4 700	4 100	-15
Приток р. Кучук-Узенбаш – с. Многогоречье	8 200	10 900	25
р. Коккозка – с. Аромат	16 000	13 600	-18
р. Черная, с. Хмельницкое	113 200	76 600	-48
р. Черная – с. Родниковое	34 800	40 050	13
р. Альма – пгт Почтовое	15 900	22 150	28
р. Альма – выше Партизанского вдхр	26 000	33 300	22

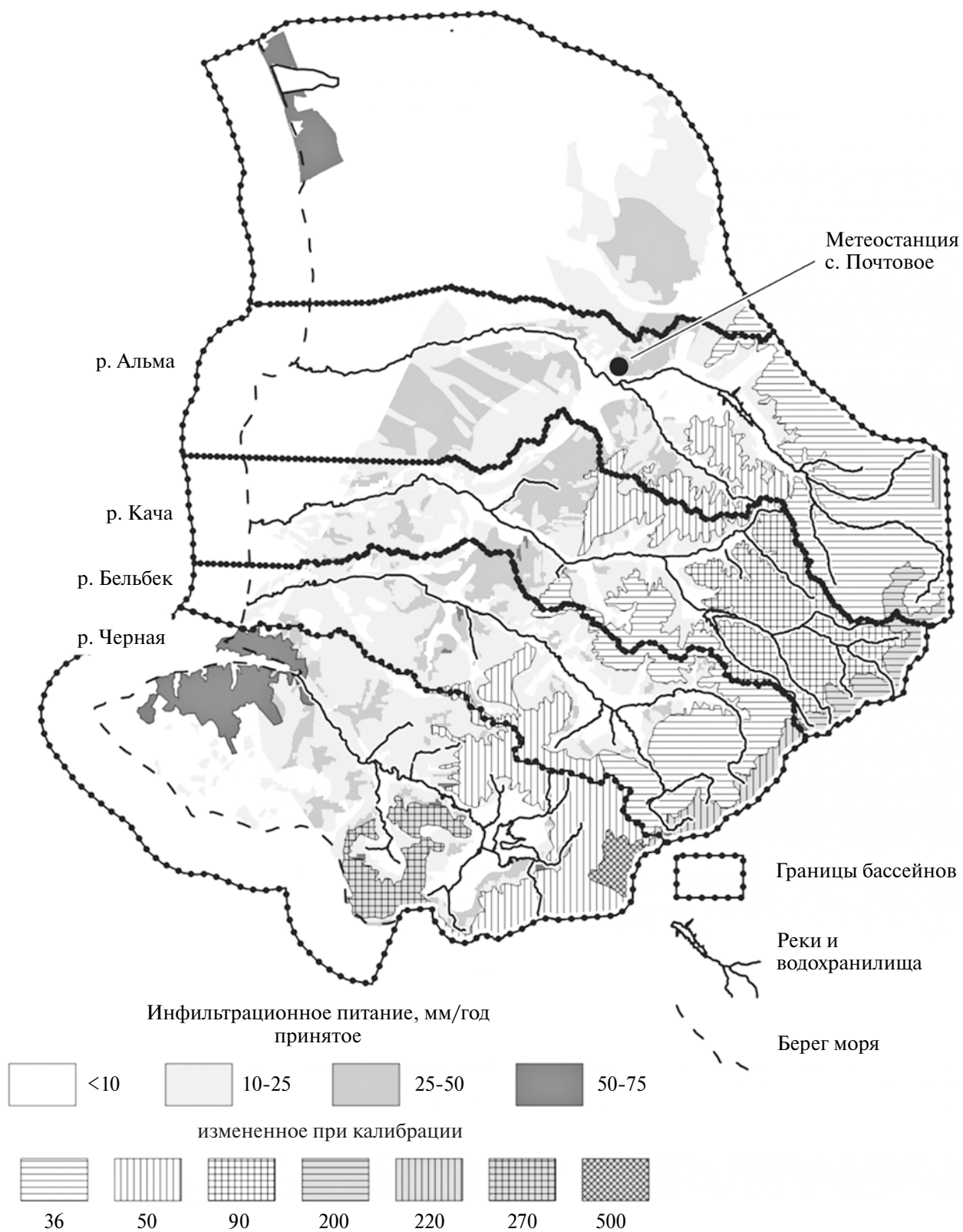


Рис. 4. Карта среднегогодового инфильтрационного питания подземных вод юго-западного Крыма на современный период.

подземных вод в районе Ай-Петринской Яйлы больше, чем поверхностный водосборный бассейн истока рек Черной и Узунджа, а именно по нему проходит внешняя граница моделируемой области.

ДАУНСКЕЙЛИНГ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ И ПОСТРОЕНИЕ КАРТ ДИНАМИКИ ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ В XXI В.

В меняющемся климате на протяжении XXI в. наибольшее влияние на условия формирования инфильтрационного питания, по-видимому, будут оказывать климатические траектории, обу-

словленные максимальной концентрацией парниковых газов. Поэтому для прогноза выбраны экстремальный климатический сценарий SSP5-8.5 (RCP 8.5) [19] и ансамбль МОЦАО из семейства CMIP5. Для даунскейлинга прогнозных моделей использовался стохастический генератор метеорядов суточного разрешения LARS-WG [18]. На первом этапе был составлен ансамблевый прогноз изменения метеоусловий на конец XXI в. для предгорного лесостепного климата путем даунскейлинга результатов 19 МОЦАО для сценария SSP5-8.5 на основе многолетних суточных рядов метеорологических данных метеостанции с. Почтового (рис. 4). В результате для прогноза по каждой МОЦАО сгенерированы

Таблица 3. Среднегоголетние характеристики прогнозных метеорологических рядов на современный период и конец XXI в. и результаты расчета среднегоголетнего инфильтрационного питания для лесостепного ландшафта с горно-лесными почвами

Модель	Осадки		Температура		Потенциальная эвапотранспирация		Индекс увлажнения		Инфильтрационное питание	
	P , мм/год	ΔP , мм/год	T , град	ΔT , град	PET	PET/PET _{base}	$I = P/PET$	ΔI	w , мм/год	Δw , мм/год
ACCESS1-3	463	-56	16.7	5.3	1014	1.21	0.46	-0.17	4.0	-14.1
BCC-CSM1-1	473	-47	15.3	3.8	930	1.11	0.51	-0.11	11.7	-6.3
CanESM2	544	25	16.4	5.0	966	1.16	0.56	-0.06	11.6	-6.5
CMCC-CM	417	-103	16.4	5.0	981	1.17	0.42	-0.2	2.5	-15.5
CNRM-CM5	641	121	15.2	3.8	931	1.11	0.69	0.07	38.4	20.4
CSIRO-MK36	472	-47	15.1	3.7	971	1.16	0.49	-0.14	6.6	-11.4
EC-EARTH	524	4	15.0	3.6	926	1.11	0.57	-0.06	17.1	-1.0
GFDL-CM3	511	-9	17.7	6.3	1065	1.28	0.48	-0.14	3.8	-14.3
GISS-E2-R-CC	461	-58	14.9	3.5	931	1.12	0.49	-0.13	5.1	-13.0
HadGEM2-ES	474	-46	16.5	5.0	1036	1.24	0.46	-0.16	8.0	-10.0
INMCM4 "средняя"	454	-66	14.4	3.0	913	1.09	0.5	-0.13	10.8	-7.22
IPSL-CM5A-MR "сухая"	402	-118	17.0	5.6	998	1.2	0.4	-0.22	3.2	-14.8
MIROC-ESM	438	-82	17.7	6.3	1030	1.23	0.43	-0.2	4.5	-13.5
MIROC5	520	1	16.1	4.7	995	1.19	0.52	-0.1	17.2	-0.8
MPI-ESM-MR	474	-45	14.9	3.5	923	1.11	0.51	-0.11	13.3	-4.8
MRI-CGCM3 "влажная"	552	33	15.2	3.7	933	1.12	0.59	-0.03	18.0	-0.1
NCAR-CCSM4	478	-41	15.1	3.7	955	1.14	0.5	-0.12	9.4	-8.7
NCAR-CESM1-CAM5	468	-51	16.3	4.9	1020	1.22	0.46	-0.16	6.8	-11.3
NorESM1-M	492	-28	15.4	3.9	965	1.16	0.51	-0.11	11.4	-6.7
Baseline	519	0	11.4	0.0	835	1	0.62	0	18.1	0.0

100-летние стационарные ряды осадков, температуры и солнечной радиации, отвечающие прогнозным условиям конца XXI в. Затем для одного из наиболее распространенных на рассматриваемой территории ландшафтов проведено моделирование формирования инфильтрационного питания [2] по разным прогнозным рядам метеорологических характеристик. Среднегодовое инфильтрационное питание в сопоставлении с современными условиями (“Baseline”) представлены в табл. 3.

Анализ результатов, приведенных в табл. 3, показал, что только одна модель (CNRM-CM5) дает на конец XXI в. весьма существенное (на >140 мм) увеличение осадков и, как следствие, существенное увеличение питания. Эта модель была исключена из дальнейшего анализа, так как ее результат можно рассматривать как выброс из ансамбля прогнозов. Из оставшихся 18 моделей для прогнозных расчетов инфильтрационного питания для всей исследуемой территории на основе изменений индекса увлажнения выбраны три модели, характеризующие весь спектр неопределенности климатических прогнозов: “сухая” модель – IPSL-CM5A-MR, “влажная” модель – MRI-CGCM3 и “средняя” модель – INMCM4.

Далее для каждой из выбранных климатических моделей с шагом 20 лет от 2040 до 2100 г. проводились генерация климатических рядов и расчет питания подземных вод в области предгорной и равнинной частей территории по той же методике, что и для современного периода.

Прогноз изменения питания подземных вод в горной части репрезентативного бассейна составлен по разработанной модели формирования стока карстового массива “осадки–сток”, учитывающей специфику карстовых регионов с поверхностными формами карстопроявления [5]. Данная модель откалибрована на основе воспроизведения среднегодового расхода Скульского источника, расположенного в горной части репрезентативного бассейна. По результатам прогноза для сценария SSP5-8.5 по этой модели на конец XXI в. получено следующее относитель-

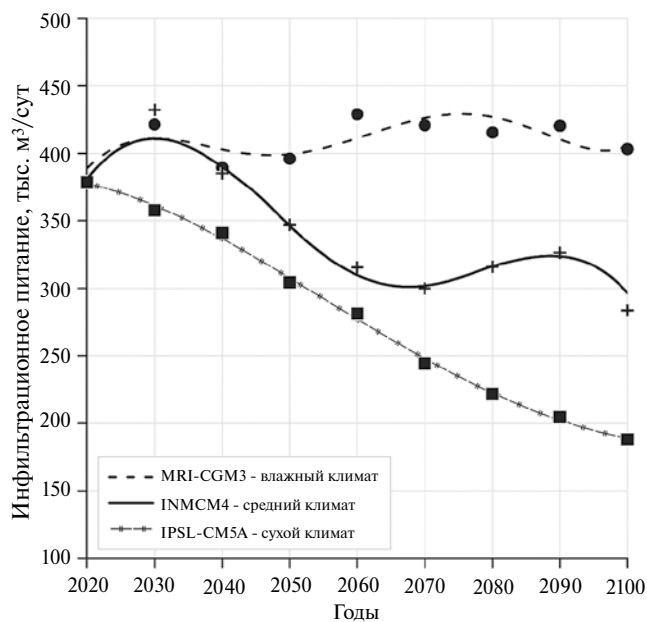


Рис. 5. Прогнозная динамика изменения суммарного расхода инфильтрационного питания в XXI в.

ное изменение прогнозного среднегодового расхода Q по отношению к расходу при отсутствии климатических изменений Q_{base} для трех выбранных МОЦАО: “средняя” (INMCM4) – $Q/Q_{base} = 0.85$; “влажная” (MRI-CGCM3) – $Q/Q_{base} = 1.05$; “сухая” (IPSL-CM5A-MR) – $Q/Q_{base} = 0.54$. Эти соотношения в дальнейшем использовались при составлении прогнозных карт питания для определения изменения инфильтрационного питания на всей области горных склонов и плато. При этом изменение инфильтрационного питания в горной части описывается линейной моделью от начального (принятого за 1 д.е. на 2020 г.) до рассчитанных значений на конец XXI в. На рис. 5 показана динамика изменения суммарного расхода среднегодового инфильтрационного питания за весь прогнозный период для каждой из трех выбранных климатических моделей.

ПОСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ГЕОФИЛЬТРАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЮГО-ЗАПАДНОГО КРЫМА

Численные эксперименты, воспроизводящие возможные изменения режима и баланса подземных вод при сохраняющемся водоотборе

и меняющемся питании подземных вод, проводились на откалиброванной на современный период геофильтрационной модели для каждого из показанных на рис. 5 возможных прогнозов изменения инфильтрационного питания. Для этого моделирование проводилось в нестационарной постановке с 2020 по 2100 г. В качестве начальных условий использовались уровни

подземных вод, инфильтрационное питание и меженные расходы рек, полученные при калибровке модели на современный период. Прогнозное климатическое изменение инфильтрационного питания задавалось с шагом в 10 лет.

Расчеты проводились для трех климатических моделей, которые были описаны ранее. Для рав-

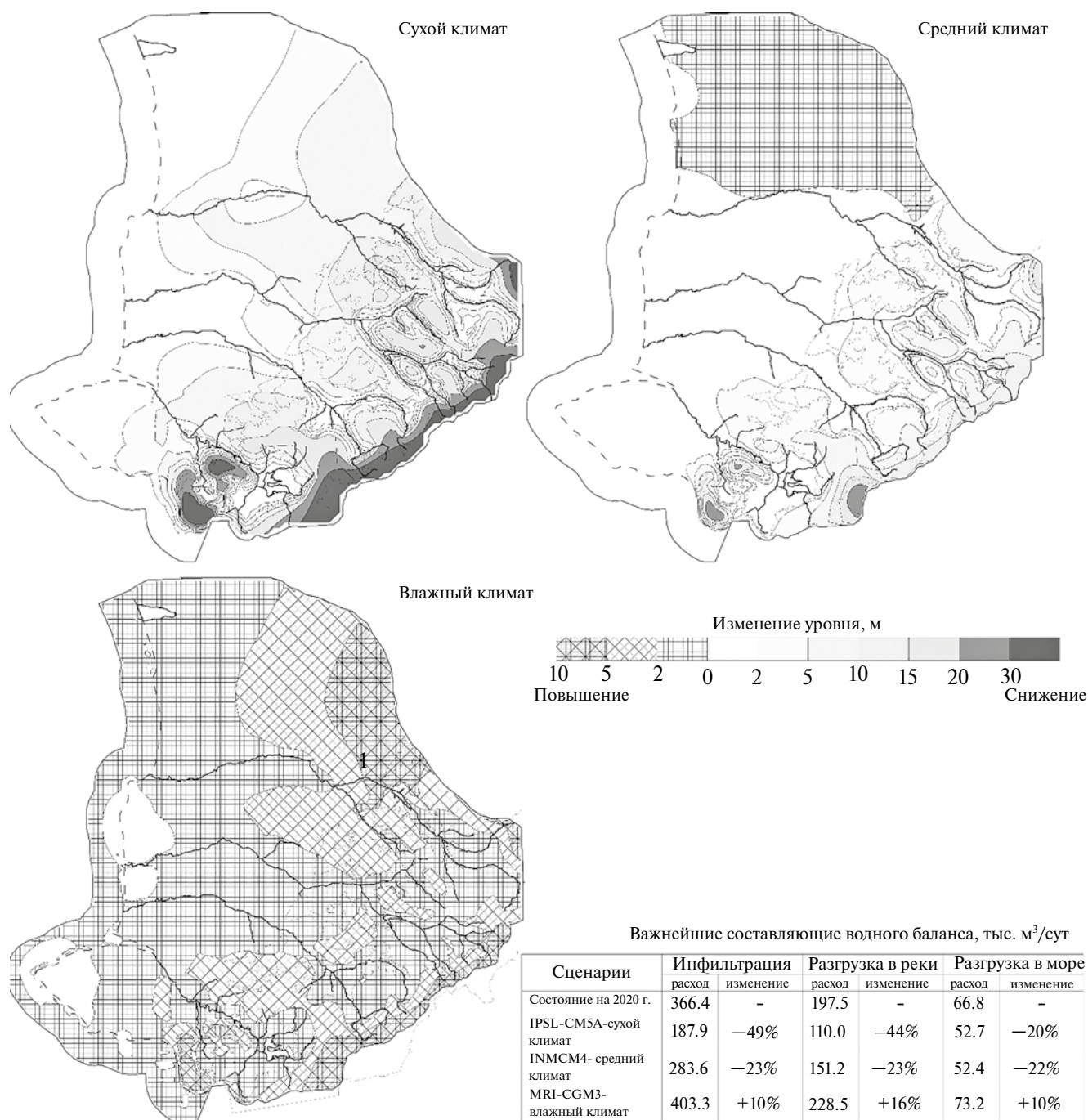


Рис. 6. Модельные схемы изменения уровней подземных вод на конец XXI в.

нинной части использованы соответствующие прогнозные карты инфильтрационного питания, а для горной части – рассчитанные по родниковому стоку его относительные изменения. Таким образом, модельный эксперимент был поставлен на трех вариантах геофильтрационной модели, отличающихся друг от друга только параметрами инфильтрационного питания.

В сравнительной табл. 4 показано изменение элементов баланса подземных вод на конец XXI в. для каждого из трех выполненных прогнозных экспериментов. Из табл. 4 следует, что изменение питания подземных вод к концу XXI в. компенсируется в основном за счет сокращения речного стока. На картах изменения уровней (рис. 6) видно, что наибольшее снижение уровней подземных вод ожидается в пределах горной части, что будет сопровождаться снижением в первую очередь поверхностного стока в верховьях рек.

Полученное при моделировании снижение уровней приводит к сокращению емкостных запасов подземных вод. Это сокращение обеспечивает несколько меньшую, чем сокращение речного стока, часть компенсации изменения питания подземных вод. Таким образом, уменьшение разгрузки подземных вод в гидросеть и емкостные запасы обеспечивают существенную адаптацию к возможному уменьшению инфильтрационного питания на фоне существующего водоотбора в течение XXI в.

Разгрузка подземных вод в море меняется незначительно. Вероятно, это обусловлено расположением водозаборов – большая их часть расположена вблизи берега моря и перехватывает естественный поток подземных вод.

Полученный разброс результатов моделирования между тремя климатическими моделями связан с тем, что прогнозные изменения годовых сумм осадков имеет значительный диапазон для выбранных МОЦАО, приводящий к существенным неопределенностям в изменении прогнозного инфильтрационного питания.

ВЫВОДЫ

По результатам проведенного модельного анализа можно сделать следующие ниже выводы о влиянии ожидаемых климатических изменений на подземные воды юго-западного Крыма.

Ансамблевый прогноз климатических изменений в течение XXI в. показал, что при одном и том же неблагоприятном климатическом сценарии SSP5-8.5, по результатам всех используемых МОЦАО, наблюдается повышение температуры приземной атмосферы в исследуемом регионе, но прогнозные изменения годовых сумм осадков имеет значительный разброс от модели к модели, приводящий к существенным неопределенностям в изменениях прогнозного инфильтрационного питания.

Проведенное моделирование прогнозного инфильтрационного водообмена с использованием результатов даунскейлинга прогноза по ансамблю МОЦАО показало, что изменение среднесуточного инфильтрационного питания имеет высокую, по сравнению с существующим, корреляцию с изменением прогнозного индекса увлажнения. Это позволило ранжировать все используемые МОЦАО по прогнозируемому индексу увлажнения и выбрать для дальнейшего использования три климатических прогноза: по “су-

Таблица 4. Прогнозный баланс подземных вод согласно трем климатическим моделям в сопоставлении с современными условиями на конец XXI в., тыс. м³/сут

Расчетная МОЦАО	Питание подземных вод			Разгрузка подземных вод		
	инфильтрация	приток с севера	емкостные запасы	в реки	водоотбор скважинами	в море
Состояние на 2020 г.	366.4	25.6	0.0	197.5	127.7	66.8
IPSL-CM5A – сухой климат	187.9	28.7	73.8	110.0	127.7	52.7
INMCM4 – средний климат	283.6	26.9	20.8	151.2	127.7	52.4
MRI-CGM3 – влажный климат	403.3	25.7	0.4	228.5	127.7	73.2

хой” модели – IPSL-CM5A-MR, по “средней” модели – INMCM4 и по “влажной” модели – MRI-CGCM3.

Диапазон прогнозного уменьшения сред-немноголетнего инфильтрационного питания для наиболее распространенного равнинного ландшафта юго-западного Крыма составляет от 0.1 мм/год для “влажной” и до 15 мм/год для “сухой” МОЦАО. Диапазон изменения инфильтрационного питания в горной части варьирует от увеличения на 5% для “влажной” модели до уменьшения на 46% для “сухой” модели.

Наибольшее изменение ресурсов подземных вод юго-западного Крыма будет в случае, если в течение XXI в. произойдет снижение осадков на ~49%, как предсказывает “сухая” модель – IPSL-CM5A-MR. В случае если ситуация будет развиваться по “влажной” модели – MRI-CGCM3, то, несмотря на увеличение температуры, не произойдет уменьшения ни подземного стока, ни минимального стока рек. В случае ситуации по “средней” модели – INMCM4, по которой осадки уменьшатся на 23%, сократится разгрузка подземных вод в реки на 23% и в море – на 22%. Это сокращение разгрузки и сработка емкостных запасов компенсируют снижение приходной части баланса подземных вод – инфильтрационно-го питания.

Результаты прогнозного геофильтрационного моделирования на основе “сухой” климатической модели, характеризующейся 49%-м уменьшением инфильтрационного питания, показали наибольшее снижение уровней подземных вод к концу XXI в. по сравнению с двумя другими моделями. Однако это снижение уровней, вызванное “дефицитом” инфильтрационного питания, компенсируется на ~40% сработкой емкостных запасов подземных вод, на ~50% – сокращением речного стока и на ~10% – сокращением разгрузки в море и притоком с севера. При этом, даже по этой наиболее неблагоприятной с позиций естественных ресурсов модели, к концу XXI в. сокращение разгрузки подземных вод в море составит ~20% от рассчитанной на 2020 г. Таким образом, уменьшение разгрузки подземных вод в гидросеть и емкостные запасы обеспечивают существенную адаптацию к возможному умень-

шению инфильтрационного питания на фоне существующего водоотбора в течение XXI в.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Мотовилов Ю.Г., Гусев Е.М. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Фундамент. приклад. климатология. 2021. Т. 7. № 1. С. 36–79.
2. Гриневский С.О., Поздняков С.П. Принципы региональной оценки инфильтрационного питания подземных вод на основе геогидрологических моделей // Вод. ресурсы. 2010. Т. 37. № 5. С. 543–557.
3. Каюкова Е.П., Юровский Ю.Г., Устюгов Д.Л., Гребнева А.В. Пресные воды Крыма // Геология и недропользование. 2021. № 1. С. 92–103.
4. Косицкий А.Г., Богуцкая Е.М., Гречушникова М.Г., Григорьев В.Ю., Сазонова А.А., Харламов М.А., Фролова Н.Л. Оценка собственных возобновляемых водных ресурсов Крымского полуострова // Вод. ресурсы. 2022. Т. 49. № 4. С. 423–436.
5. Поздняков С.П., Бакиевская В.А., Чиганов И.А. Моделирование родникового стока в трещинно-карстовом массиве в условиях климатических изменений // Инженерная геология. 2023. Т. 18. № 2. С. 30–42.
6. Приблуда В.Д., Коджаспиров А.А., Дублянский В.Н. Баланс подземных вод юго-западной части Горного Крыма // Геол. журнал. 1979. Т. 39. № 2. С. 38–46.
7. Пугач Л.С., Кокорева С.В. Создание комплектов гидрогеологических и инженерно-геологических карт масштаба 1 : 1000000 по группе листов территории Российской Федерации в 2017–2019 гг. М.: Гидроспецгеология, 2019.
8. Токарев С.В. Уязвимость карстовых подземных вод горного Крыма к загрязнению: выявление, оценка и картирование. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Симферополь: КФУ, 2020. 26 с.
9. Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Гельфан А.Н., Сазонов А.А., Шевченко А.И. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: Обзор публикаций. 1 Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Вод. ресурсы. 2022. Т. 49. № 3. С. 251–269.
10. Харитоновна Н.А., Филимонова Е.А., Картунов Е.В., Самарцев В.Н., Дробязко Е.В., Сорокоумова Я.В.,

- Гречушникова М.Г., Прошкина А.Л., Поздняков С.П.* Изотопно-геохимические характеристики природных вод юго-западной части крымского полуострова // Вод. ресурсы. 2022. Т. 49. № 4. С. 474–491.
11. *Чиганов И.А., Гриневский С.О., Поздняков С.П.* Геогидрологическое моделирование для оценки влияния климатических изменений на питание подземных вод // Тр. Всерос. науч. конф. и с международ. участием “Современная гидрогеология: актуальные вопросы науки, практики и образования.” М., 2023. С. 227–232.
 12. *Шестопалов В.М., Богуславский А.С., Климчук А.Б., Фесенко А.В., Годенко Г.Е.* Моделирование ресурсов подземных вод юго-западной части Горного Крыма // ГПИМО. 2008. № 4. <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-resursov-podzemnyh-vod-yugo-zapadnoy-chasti-gornogo-kryma> (дата обращения: 05.04.2024)
 13. *Blöschl G. et al.* Twenty-three Unsolved Problems in Hydrology (UPH) – a community perspective // Hydrol. Sci. J. 2019. V. 64. № 10. P. 1141–1158. doi.org/10.1080/02626667.2019.1620507
 14. *Cuthbert M.O., Gleeson T., Moosdorf N., Befus K.M., Schneider A., Hartmann J., Lehner B.* Global patterns and dynamics of climate–groundwater interactions // Nature Clim. Change. 2019. V. 9. P. 137–141. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0386-4>
 15. *Kuang X., Liu J., Scanlon B.R., Jiao J.J., Jasechko S., Lancia M., Biskaborn B.K., Wada Y., Li H., Zeng Zh., Guo Zh., Yao Y., Gleeson T., Nicot J-P., Luo X., Zou Y., Zheng Ch.* The changing nature of groundwater in the global water cycle // Sci. 2024. V. 383. I. 6686. DOI: 10.1126/science.adf0630
 16. *Langevin C.D., Hughes J.D., Banta E.R., Niswonger R.G., Panday S., Provost A.M.* Documentation for the MODFLOW 6 Groundwater Flow Model. Reston, VA: USGS Publications Warehouse, 2017. P. 197. <https://doi.org/10.3133/tm6A55>
 17. *Moss R.H., Edmonds J.A., Hibbard K.A., Manning M.R., Rose S.K., van Vuuren D.P., Carter T.R., Emori S., Kainuma M., Kran T., Meehl G.A., Mitchell J.F.B., Nakicenovic N., Riahi K., Smith S.J., Stouffer R.J., Thomson A.M., Weyant J.P., Wilbanks T.J.* The next generation of scenarios for climate change research and assessment // Nature. 2010. V. 463. P. 747–756.
 18. *Semenov M.A., Barrow E.M.* LARS-WG A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies. Harpenden, 2002. P. 28.
 19. *Taylor K., Stouffer R., Meehl G.* An overview of CMIP5 and the experiment design // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2015. V. 93. I 4. P. 485–498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
 20. *Winston R.B.* ModelMuse version 4: A graphical user interface for MODFLOW 6. Scientific Investigations Report. Reston, VA: USGS Publ. Warehouse, 2019. P. 2019–5036. <https://doi.org/10.3133/sir20195036>
 21. *Zomer R.J., Xu J., Trabucco A.* Version 3 of the global aridity index and potential evapotranspiration database // Sci. Data. 2022. V. 9. I. 409.

ASSESSMENT OF THE IMPACTS OF CLIMATE CHANGE IN THE 21ST CENTURY ON THE GROUNDWATER BALANCE OF THE SOUTH-WESTERN CRIMEA

V. N. Samartsev^a, I. A. Chiganov^{a, *}, S. O. Grinevsky^a, S. P. Pozdnyakov^a, Ya. V. Sorokoumova^a,
V. A. Bakshevskaya^b

^a*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

^b*Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Ivankovskaya Research Station, Konakovo, Tver region, 171251 Russia*

**e-mail: ilya-chiganov@mail.ru*

A regional groundwater flow model of southwestern Crimea within the Alma artesian basin and the adjacent area of fissure-karst groundwater in Mountain Crimea was developed and calibrated for the modern period. On the basis of numerical experiments with this model, changes in groundwater resources under the influence of expected climatic changes in the 21st century were estimated. For this purpose, predictive maps of infiltration recharge were constructed for the selected study area. The predictive maps of groundwater recharge were developed for the plain part of the study area using infiltration water exchange modeling. For the mountainous part, precipitation accumulation by surface karst forms was considered in the prediction of recharge. The extreme climate change scenario SSP5-8.5 from the GSM models of the CMPI 5 family, which assumes maximum warming, was used as the prediction scenario. As a result of ensemble forecasting, the most contrasting scenarios of aridity index change were selected and three projected maps of groundwater recharge change in the 21st century were obtained, which were then used in numerical experiments. The predicted infiltration recharge values significantly differ from the current figure of 366400 m³/day: under the «dry» climate, the recharge is 187900 m³/day, under the «average» climate, 283600 m³/day, and under the «wet» climate, 403300 m³/day. The results of the predictive groundwater balance modeling for the 21st century, using these recharge maps, demonstrated the high adaptive capacity of groundwater reserves and the reduction of minimum river runoff over the study period of about a hundred years, assuming the continuation of the current groundwater extraction rates.

Keywords: groundwater flow model, calibration, groundwater balance, climate change, infiltration recharge map, downscaling, prediction

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

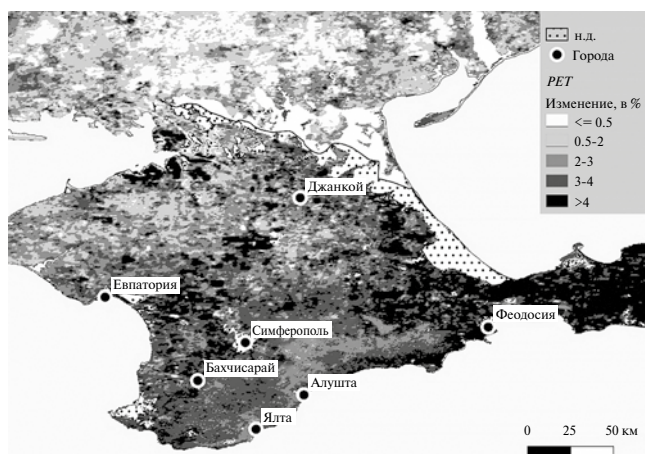


Рис. 1. Изменение PET в 2014–2021 гг. по сравнению с 2001–2013 гг.

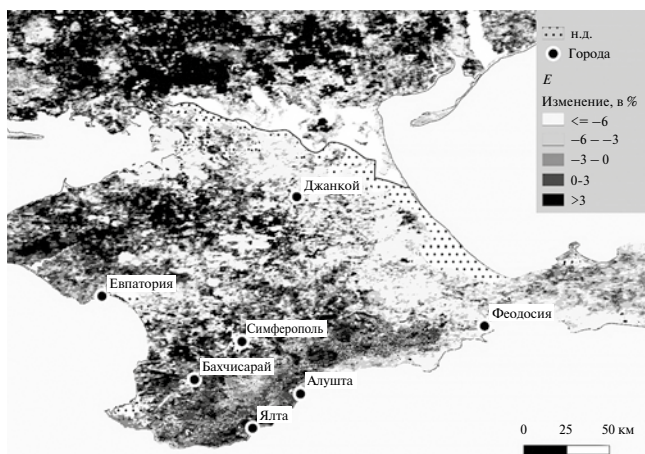


Рис. 2. Изменение E в 2014–2021 гг. по сравнению с 2001–2013 гг.

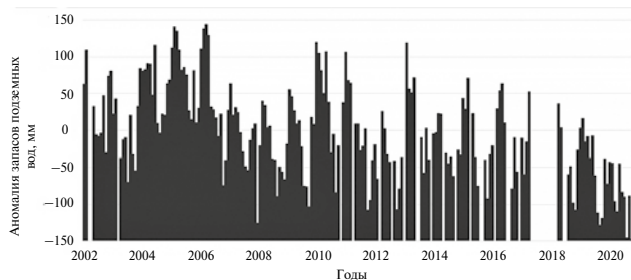


Рис. 3. Аномалии запаса подземных вод в Крыму за 04.2002–12.2020 относительно среднего за этот период. Белые полосы — пропущенные значения (по данным [5]).

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

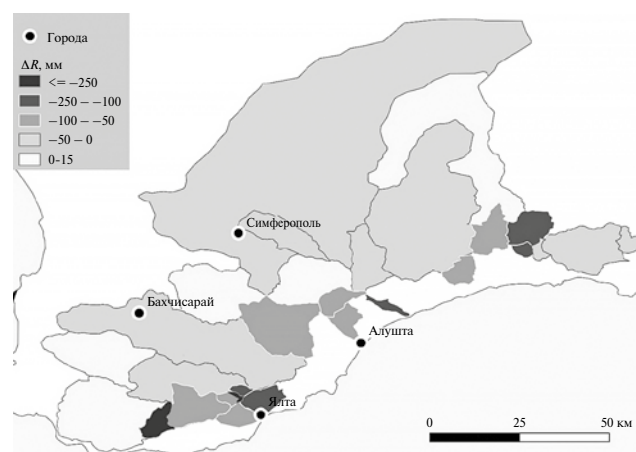


Рис. 4. Изменение R в 2014–2021 гг. по сравнению с 2001–2013 гг.

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

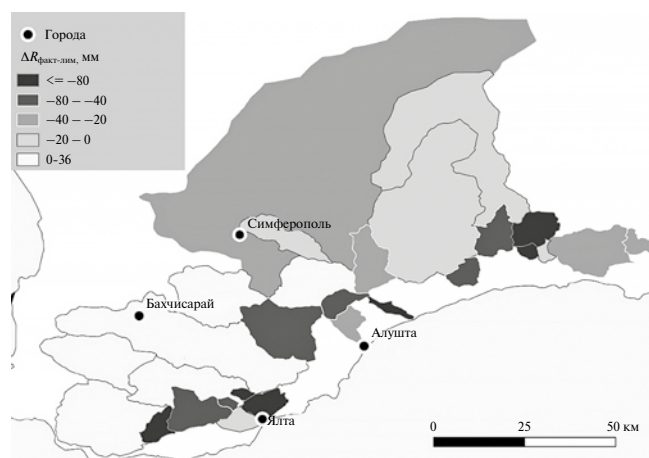


Рис. 5. Изменение $\Delta R_{\text{факт-клим}}$ (4) в 2014–2021 гг. по сравнению с 2001–2013 гг.

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

УДК 551.509.5; 556.5

К ВОПРОСУ О ПРОГНОЗИРОВАНИИ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ПАВОДКОВ НА ТЕРРИТОРИИ КРЫМА¹

© 2024 г. А. С. Лубков, Е. В. Вышкваркова*, Е. Н. Воскресенская, А. Е. Щдро

*Институт природно-технических систем, Севастополь, 299011 Россия***e-mail: aveiro_7@mail.ru*

Поступила в редакцию 15.03.2024 г.

После доработки 15.03.2024 г.

Принято к публикации 10.04.2024 г.

Катастрофические ситуации последних лет – в июне 2021 г. в районе Ялты и в январе 2024 г. в Севастополе – связанные с обильными осадками, подъемом уровня воды в реках и образованием селевых потоков, в очередной раз показали необходимость заблаговременного прогноза событий с экстремальными осадками на территории Крыма для своевременного реагирования и минимизации экономических потерь. Район горного Крыма с его сложным рельефом и большими уклонами особенно подвержен возникновению опасных ситуаций после прохождения обильных (часто многодневных) дождей. По ежедневным данным об атмосферных осадках с метеорологической станции Ай-Петри рассчитаны и проанализированы случаи с суммой осадков ≥ 40 мм за три последовательных дня. Такие условия использованы при анализе в качестве порога экстремальных осадков, приводящих к размыву русел рек горного Крыма и формированию селевых потоков. Рассмотрена ситуация катастрофического паводка на р. Черной в январе 2024 г., обусловленная выпавшими в течение трех дней экстремальными осадками в Севастопольском регионе. Затем для такой ситуации проведено исследование возможности их прогнозирования с заблаговременностью от 3 мес. с использованием разработанной модели искусственной нейронной сети. Полученные результаты показали удовлетворительное качество разработанной нейронной сети для прогноза с заблаговременностью 3 мес. 2–3-дневных экстремальных осадков, интенсифицирующих эрозионные процессы в горном Крыму.

Ключевые слова: экстремальные осадки, реки Крыма, нейронная сеть, сезонный прогноз.

DOI: 10.31857/S0321059624060092 **EDN:** VOMQDY

ВВЕДЕНИЕ

Одной из насущных проблем Крыма исторически была и остается по настоящее время водная проблема, связанная с неравномерностью распределения стока в связи с физико-географическими особенностями полуострова [4]. Стоки Крымских рек существенно отличаются от континентальных. Они относятся к особой категории рек с паводочным режимом крымского подтипа [10]. Паводки в Крыму наблюдаются преимущественно в зимне-весенний период и формируют до 80% поверхностного стока [3]. При этом в летний сезон создается дефицит стока и некоторые реки пересыхают [9]. Такой режим обеспечивается неравномерностью выпадения осадков и геоморфологической структурой речных бассейнов. Понятно,

что геологические условия практически неизменные, поэтому на первый план выходит изучение формирования как режима осадков, так и их климатических аномалий. Безусловно, как паводки, так и дефицит воды влекут за собой серьезные экологические и экономические последствия, которые усугубляются в последние десятилетия.

Для принятия управленческих решений большое практическое значение имеет анализ величин экстремальных осадков, выпадение которых приводит к ряду негативных последствий, например к паводкам и подтоплениям [6, 12]. Во время сильных ливней на реках и в оврагах нередко образуются грязекаменные потоки – сели. Они причиняют большие разрушения: уничтожают мосты, размывают дороги, смывают плодородный слой почвы или откладывают мощные наносы в садах, на виноградниках и т. д. Селевые потоки могут возникнуть практически на любой реке или в балке горного Крыма [12].

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Института природно-технических систем (номер госрегистрации 124013000609-2).

Показательны катастрофические ситуации последних лет следующие. Первая сложилась в июне 2021 г., когда в Ялте и на Ай-Петри выпало 2–3-месячные нормы осадков в течение двух дней. В результате в Ялте вышли из берегов реки Водопадная и Дерекойка, затопив многие улицы, дома и переходы, были отключены ЛЭП. Несколько поселков городского типа в районе Большой Ялты и участки трасс на Южном берегу Крыма пострадали от мощных селевых потоков, что нанесло значительный ущерб рекреационной инфраструктуре региона.

Сход селей и вынос значительного количества седиментационного материала произошли во многих районах Большой Ялты, что нанесло значительный ущерб рекреационной инфраструктуре. В то же время сели и множественные обрушения склонов с выносом продуктов обрушения в Байдарскую и Чернореченскую долину обеспечили подтопление многих (почти 70 участков) домохозяйств в этой части Крыма. Другая ситуация возникла в январе 2024 г. Тогда после трех дней с экстремальными осадками произошла техногенная катастрофа в бассейне р. Черной, в результате которой г. Севастополь на неделю лишился городского водоснабжения. Из-за непогоды в Севастопольском регионе стремительно поднялся уровень воды в реках, подтопленными оказались почти 70 участков, водозаборные сооружения вышли из строя.

Описанные критические ситуации произошли вследствие выпадения обильных ливней. Ливневые осадки – основной фактор формирования эрозионных процессов, которые в комплексе с большими уклонами и небольшими водосборными площадями горных рек Крыма способствуют быстрой концентрации стока в руслах [6].

Следует отметить, что южная часть п-ова Крым характеризуется наибольшей неравномерностью выпадения осадков во времени и величинами экстремальных осадков [26]. Согласно последнему отчету ИРСС, частота случаев с экстремальными осадками имеет тенденцию к увеличению во многих регионах земного шара на фоне роста приземной температуры воздуха [17]. Положительные тренды частоты и интенсивно-

сти экстремальных осадков обнаружены и для территории России, в том числе п-ова Крым [1, 27]. Прогнозирование подобных ситуаций – актуальная задача гидрометеорологии как с научной точки зрения, так и в прикладном аспекте для минимизации негативных последствий этих ситуаций. Для предотвращения и минимизации указанных последствий необходим качественный заблаговременный прогноз осадков.

Один из современных способов прогнозирования осадков – использование искусственных нейронных сетей (НС). В последнее десятилетие появились работы, в которых применяются модели для такого прогнозирования месячного и сезонного масштаба в отдельных регионах земного шара. В частности, отдельные авторы применяли разные НС для прогнозирования муссонных осадков в Индии [24, 25] и Шри-Ланке [23], прогнозирования осадков в Австралии [14, 15, 21], Иордании [13], Китае [19] и Греции [22]. Исследования [15, 19, 24, 25, 29] выполнены с применением нескольких конструкций НС. При этом однонаправленная гетероассоциативная НС с одним или несколькими скрытыми слоями (часто такую схему НС называют многослойным персептроном) показала конкурентные результаты.

Модели для прогнозирования среднемесячных и среднесезонных осадков на основе НС можно условно разделить на две группы по входным данным: 1) использующие региональные метеорологические характеристики за некоторый предыдущий период (осадки, минимальная и максимальная температура, влажность, различные индексы осадков); 2) использующие глобальные климатические сигналы (Южное колебание Эль-Ниньо (ЭНЮК), Тихоокеанская десятилетняя осцилляция (ТДО), Атлантическая мультideкадная осцилляция (АМО), Индоокеанский диполь (ИОД) и др.). При этом удовлетворительное качество моделирования было достигнуто как в первом случае, например в [13, 14, 24], так и во втором [15, 21, 24].

В данной работе на основе многолетних данных наблюдений при использовании метода искусственной НС рассмотрена возможность прогнозирования случаев экстремальных атмо-

сферных осадков как причины размыва русел рек и обрушения склонов.

ДАННЫЕ И МЕТОДИКА

В работе использованы ежедневные данные атмосферных осадков с метеостанции Ай-Петри за период 1950–2020 гг. и данные по Севастополю за период 1950–2024 гг. Метеостанция Ай-Петри выбрана для анализа, поскольку и р. Черная, и реки Ялты берут свое начало со склонов и подножия Ай-Петринской яйлы.

В качестве критерия опасного явления выбран порог осадков в 40 мм за 3 последовательных дня. Каждое такое явление считалось независимой гидрологической ситуацией, и обучение системы искусственного интеллекта проводилось именно на основе регистрации таких явлений.

Использовали модель на основе НС из [8, 20], она изображена схематически на рис. 1. Первый шаг (рис. 1, этап 1) в предлагаемой модели — декомпозиция прогнозируемого ряда на низкочастотную и высокочастотную компоненты. Разложение проводилось с использованием 9-летнего среднего скользящего фильтра. Сглаженный фильтром ряд принимался за низкоча-

стотную компоненту, а ряд разности исходных и сглаженных значений — за высокочастотную. Поскольку низкочастотная компонента в разные месяцы объясняет в среднем 10% дисперсии, ее моделирование осуществлялось простейшей множественной линейной регрессией.

На следующем этапе осуществлялись выбор и сортировка предикторов, используемых на этапе моделирования (рис. 1, этап 2). Области, в которых рассчитывались предикторы, аналогичны представленным в работах [8, 20], однако имеются изменения в наборе предикторов поля геопотенциала на изобарической поверхности 500 мб. Все выбранные для этого исследования области изображены на рис. 2.

Основное отличие от ранней конфигурации модели [8] на этом этапе — использование нелинейного непараметрического метода поиска статистических связей Василия Хёффдинга (корреляция “Hoeffding’s D”) [16]. Метод Хёффдинга в некоторой степени повторяет ранговую корреляцию Кендалла [18], где рассматривается согласование/несогласование пары наблюдений. Отличительная черта — использование не только пары наблюдений, но и двух изолированных последовательностей этой пары. Если между

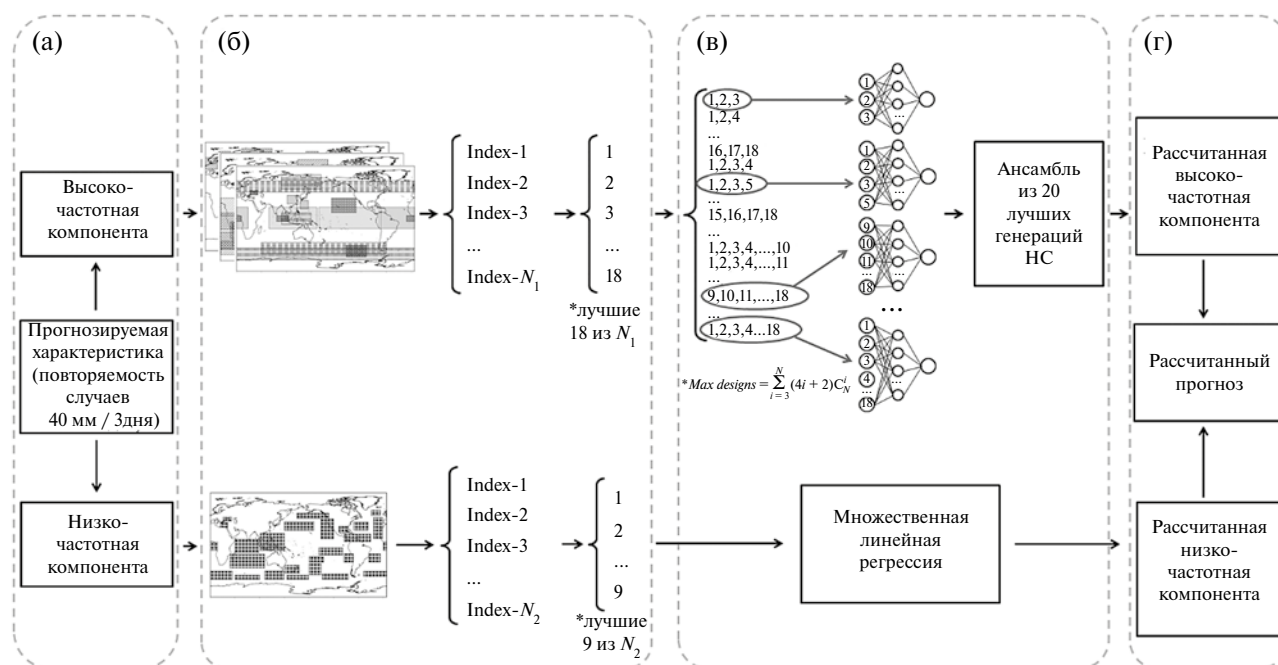


Рис. 1. Схема предлагаемой модели: а — декомпозиция моделируемого ряда; б — предварительная обработка данных; в — моделирование; г — результаты моделирования и проверка.

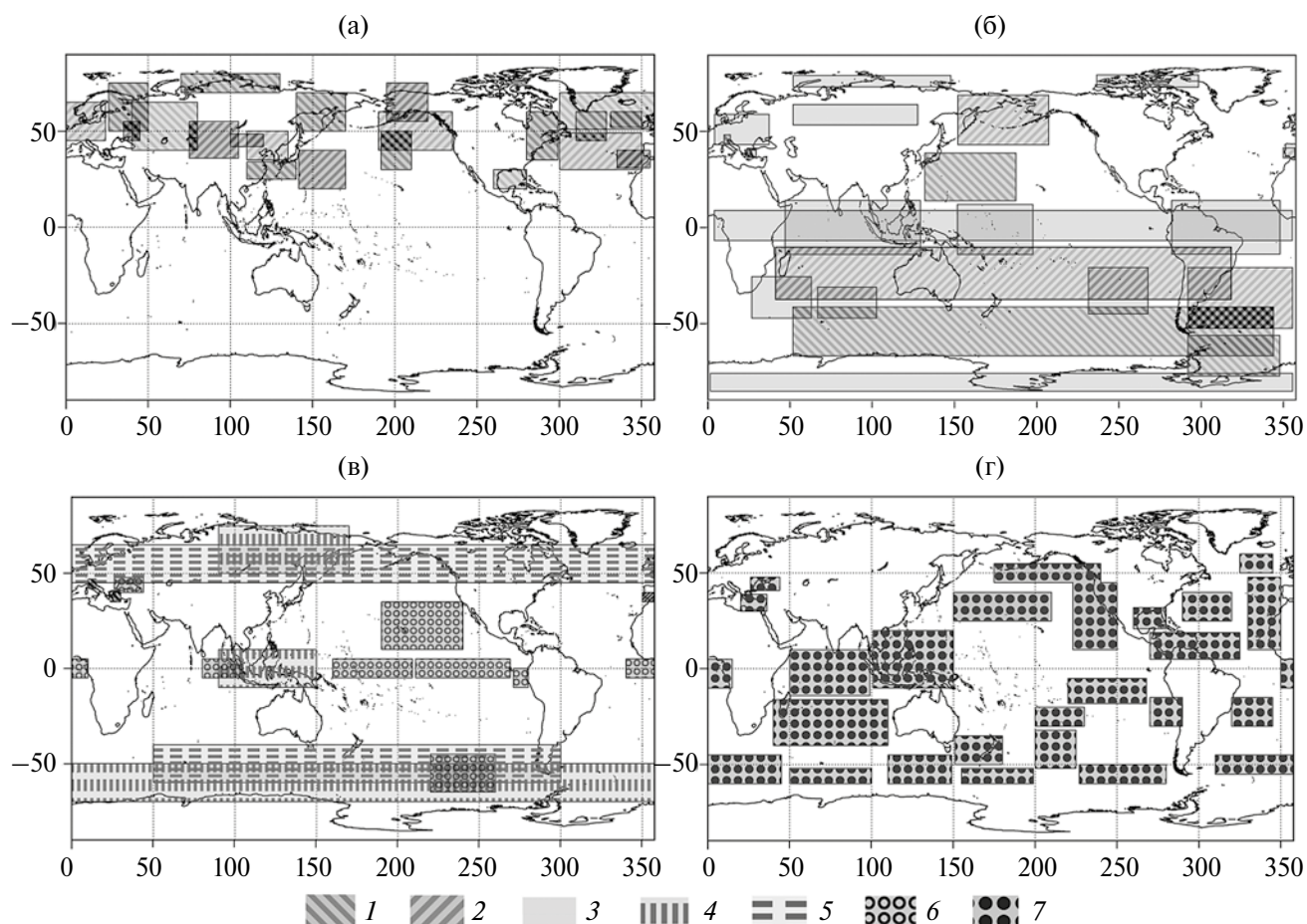


Рис. 2. Локализация пространственного расположения индексов. Области индексов геопотенциальной высоты на изобарической поверхности 500 мб отмечены штриховкой 1, 2 и 3; меридиональной и зональной составляющих ветра — 4 и 5 соответственно, ТПО — 6 и сглаженные 9-летним средним скользящим фильтром ряды ТПО — 7.

последовательностями существует зависимость, наблюдаемое совместное распределение будет отличаться от независимых, указывая на то, что ранги в одной последовательности систематически связаны с рангами в другой. Метод Хёфдинга, по сути, оценивает — отклоняется ли наблюдаемое совместное распределение рангов от того, что можно было бы ожидать, если бы последовательности были независимы.

В ядре модели (рис. 1, этап 3) используется однонаправленная гетероассоциативная многослойная НС, представленная персептроном с одним скрытым слоем (именуемая также многослойным персептроном). Выходной слой представлен одним нейроном. Функция активации нейронов НС — сигмоидальная биполярная $f(x) = \tanh(\beta x)$. Предложенная схема модели подра-

зует обучающую (38 лет — 1950–1987 гг.), тестовую (19 лет — 1988–2006 гг.) и контрольную (14 лет — 2007–2020 гг.) выборки. Еще 4 года (2021–2024 гг.) моделировались без сравнения с действительным рядом.

Моделирование проводилось путем множественного перебора комбинаций входных сигналов, в результате которого формируется вектор решений с разными конструкциями НС. На тестовой выборке выбирались наилучшие 20 конструкций НС. Для дальнейшего анализа расчетных данных использовались средние рассчитанные значения 20 лучших конструкций НС, представленные в виде блочных диаграмм.

Способность модели прогнозировать оценивалась в сравнении с контрольной выборкой

(2007–2020 гг.) с использованием следующих параметров:

– коэффициент корреляции Пирсона:

$$r = \frac{\text{cov}(x_i, y_i)}{\sigma_x \sigma_y},$$

где σ_x и σ_y – среднеквадратические отклонения выборок x и y , которые представляют собой результат моделирования и наблюдаемые значения. Статистически значимым будет считаться расчет, у которого $r > 0.5$ (для 14 значений контрольного периода на уровне $\alpha = 0.001$).

– отношение среднего квадратичного отклонения модели относительно наблюдаемых значений (RMSE) к среднеквадратическому отклонению наблюдаемого ряда (СКО или σ):

$$RMSE / \sigma = \frac{\sqrt{\frac{\sum (x_i - y_i)^2}{n}}}{\sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}} = \sqrt{\frac{(n-1) \cdot \sum (x_i - y_i)^2}{n \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2}},$$

где n – длина ряда контрольной выборки, x_i – модель, y_i – наблюдаемая величина, $\bar{y}$ – среднее наблюдаемого ряда, i – год контрольной выборки. Значимый результат определяется, если $RMSE/\sigma < 1$ (т. е. $RMSE < \sigma$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рост приземной температуры воздуха на территории п-ова Крым способствует изменениям режима средних осадков и их экстремальных показателей [5]. Режим осадков в горном Крыму характеризуется выраженной сезонностью, наибольшее количество осадков выпадает в зимние месяцы [12]. Район Ай-Петри входит в юго-западный подрайон с зимним максимумом осадков, метеорологическая станция расположена на отметке 1180 м н.у.м. За период 1950–2020 гг. среднегодовое количество осадков на метеостанции Ай-Петри составило 1009 мм. Ряд характеризуется отрицательным трендом (19 мм/10 лет), однако он статистически не значим. Месяцы с наибольшим количеством осадков – январь и декабрь (139 и 148 мм соответственно), а минимумы осадков наблюдаются в июле–августе (52 и 55 мм соответственно). Для метеостанций горного Крыма характерны наибольшие суммы

экстремальных осадков; например, величина 95-го процентиля для зимнего сезона на метеостанции Ай-Петри составила 29 мм, а 99-го процентиля – 64 мм [2]. Территории горного Крыма свойственна наибольшая неравномерность выпадения осадков во времени, когда периоды продолжительной засухи сменяются событиями с интенсивными осадками [28]. Формирование экстремальных гидрологических/экологических явлений обуславливается совокупностью нескольких процессов: выпадение обильных осадков на протяжении нескольких дней (минимум трех); выпадение снега и его интенсивное таяние в конце периода обильного выпадения осадков; смыв наносов с поверхности склонов; образование горных ручьев, сливающихся в более крупные потоки; транспорт наносов этими потоками; возникновение селевых потоков и транспорт ими большого количества наносов.

Возникновению катастрофы в январе 2024 г. предшествовали следующие условия. Два предыдущих месяца (ноябрь и декабрь) отличались многодневными дождями, в результате чего грунт оказался перенасыщенным влагой. Выпавший 12–13 января снег на фоне отрицательной температуры воздуха в районе водосборных территорий севастопольских рек быстро растаял при последующем потеплении. С 14 по 19 января в Севастополе выпало 37 мм осадков (14 января – 13 мм, 16 января – 11 мм, 19 января – 13 мм). При этом норма осадков для января в Севастополе за последний климатический период (1991–2020 гг.) составляет 38.3 мм.

Следует отметить, что описанные ситуации не уникальны, о чем свидетельствует график месячных сумм осадков для января за период 1950–2024 гг. по данным метеостанции в Севастополе (рис. 3). Для обнаружения аналогичных ситуаций за исторический период использован индекс RX5day, который рассчитывается путем определения максимального количества осадков (мм) за 5 последовательных дней за интересующий период (в данном случае 1 мес.) [30].

Анализ многолетнего ряда январских сумм осадков в Севастополе показывает, что подобные случаи были и ранее. В 1951 г. с 20 по 23 января выпало 43 мм осадков, в 1953 и 1957 гг. в ян-

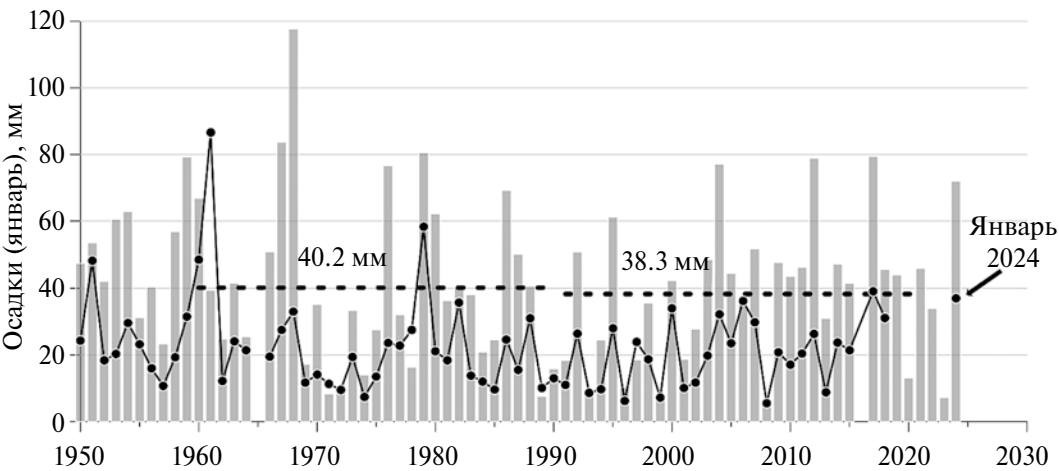


Рис. 3. Многолетний ход сумм осадков (серые столбцы) и индекса RX5day (сплошная черная линия) в январе по методу по Севастополю за период 1950–2024 гг. Пунктирной линией показана норма осадков за периоды 1961–1990 гг. и 1991–2020 гг.

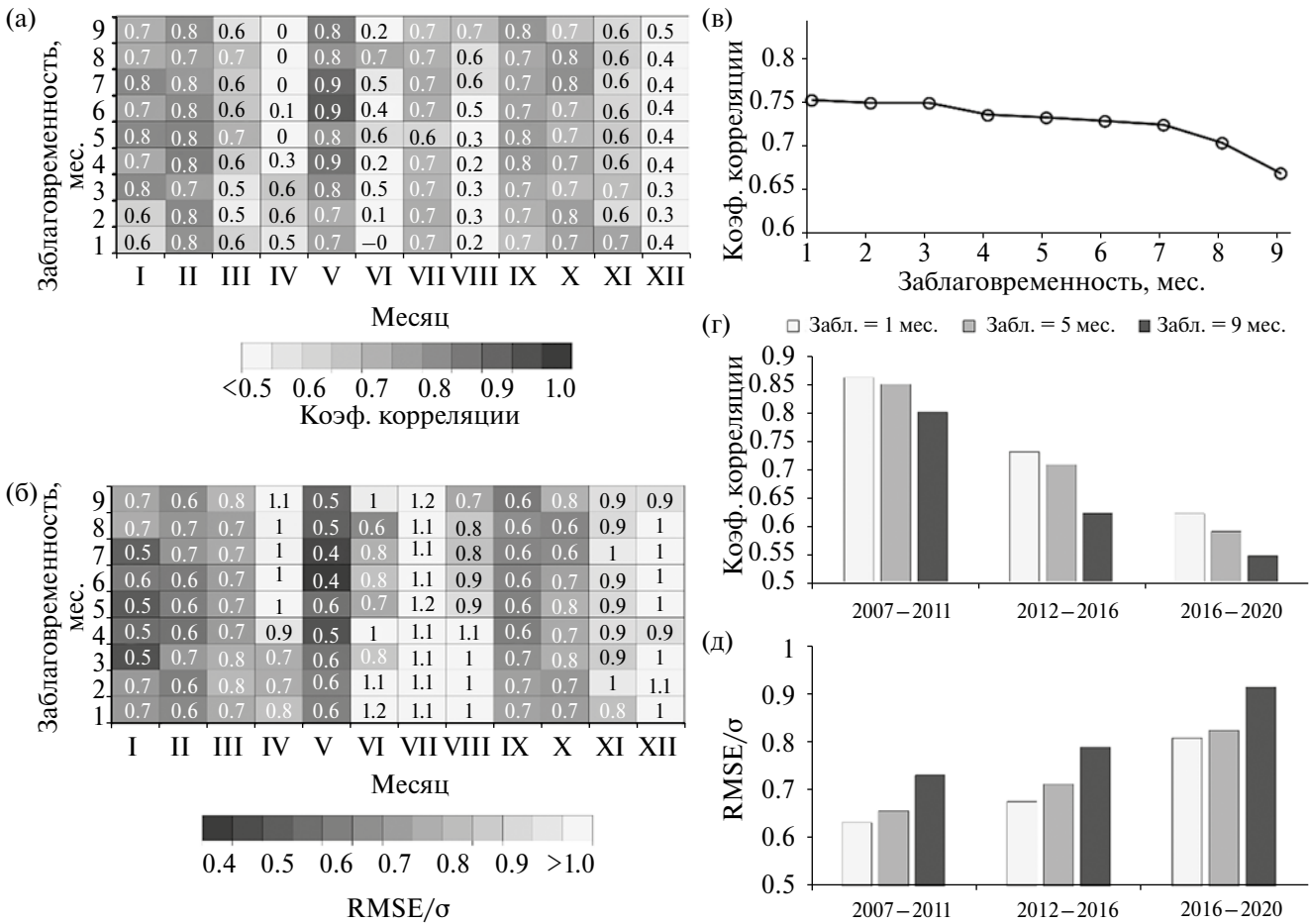


Рис. 4. Оценки способности модели прогнозировать случаи с экстремальными осадками и с использованием за контрольный период 2007–2020 гг.: а, б – диаграммы зависимости изменения мастерства моделирования в зависимости от моделируемого месяца и заблаговременности прогноза; в – изменение коэффициента корреляции в зависимости от заблаговременности; г, д – изменение мастерства моделирования для трех временных периодов контрольной выборки на примере заблаговременности 1, 5 и 9 мес.

варе выпадало >60 мм, в 1959 ~80 мм, в 1960 г. с 9 по 12 января >48 мм, в 1968 г. в январе >117 мм, в этот год 25 дней января были дождливыми. Как видно из рис. 3, ситуации, когда за несколько дней выпадало январских осадков около нормы и более, не так редки и их нужно прогнозировать.

Для среднемесячных прогнозов в Черноморском регионе, включая Крым, ранее уже применялась однонаправленная гетероассоциативная НС с одним скрытым слоем [8, 20]. Предикторами для используемой модели служили наборы индексов глобальных климатических сигналов системы океан–атмосфера. В работе [20] такая модель применена для прогноза частоты интенсивных циклонов в Черноморском регионе с заблаговременностью до 6 мес., а в работе [8] – для прогнозирования осадков в районе Ай-Петри. В этом исследовании применим архитектуру модели на основе НС из работ [8, 20], но с изменениями в конфигурации, описанными ниже.

На рис. 4 представлены оценки способности модели прогнозировать случаи с осадками >40 мм за три последовательных дня с заблаговременностью до 9 мес. за контрольный период 2007–2020 гг. Из рис. 4а, 4б видно, что только для декабря результаты моделирования статистически не значимы с любой заблаговременностью. На графике зависимости коэффициента корреляции от заблаговременности прогноза (рис. 4в) отмечена закономерная обратная связь. Также стоит отметить убывание величины коэффициента корреляции и возрастание $RMSE/\sigma$ (рис. 4г, 4д) по мере удаления от тестовой выборки (1988–2006 гг.), участвующей в процессе моделирования для определения момента максимума обучения (подробная методика описана в работе [8]). Таким образом, можно отметить нестационарность модели и, следовательно, необходимость ее пересчета каждые 5 лет.

На рис. 5 представлены результаты моделирования случаев с осадками >40 мм за три последовательных дня в виде блочных диаграмм за период 2007–2024 гг., включающих контрольную выборку и построенных на основе 20 лучших конструкций НС. В большинстве случаев модель улавливает экстремальные месяцы, когда наблюдалось ≥ 2 событий превышения порога

40 мм осадков за 3 последовательных дня. Так, в ноябре 2007 г. наблюдалось 4 случая, модель показала в среднем 3; в декабре 2010 г. наблюдалось 4 случая, модель показала 3; в июле 2018 г. наблюдалось 3 случая, модель показала разброс от 1 до 2 (при средней многолетней величине 0.3 случая); в январе 2019 г. наблюдалось 3 случая, модель показала разброс от 1 до 3. Также в этот временной период (2007–2024 гг.) наблюдалось 14 мес., за которые отмечены 2 случая превышения порога 40 мм осадков за 3 последовательных дня. Для 10 из 14 мес. модель верно воспроизводит случаи превышения порога осадков. Для 4 мес. количество моделируемых случаев было занижено.

Особое внимание авторов работы привлекло событие, произошедшее в Севастопольском регионе в январе 2024 г. Предложенная модель смогла спрогнозировать возникшую климатическую аномалию. Заблаговременный модельный прогноз показал наступление в январе 2024 г. двух событий превышения порога 40 мм осадков за 3 последовательных дня. В описанных случаях экстремальные осадки, выпавшие за короткий промежуток времени, привели к быстрому заполнению русел горных рек, подъему уровня воды и, как следствие, интенсификации эрозионных процессов. Поскольку русла рек горного Крыма имеют существенные уклоны, то их потоки обладают большой размывающей способностью и во время паводков могут транспортировать большое количество наносов разного размера [6, 11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сложные орографические условия п-ова Крым, наблюдаемый рост температуры воздуха и параметров экстремальных осадков в горном Крыму формируют благоприятные условия для возникновения паводков, носящих катастрофический характер.

Катастрофическая гидролого-экологическая ситуация, возникшая в январе 2024 г. в Севастопольском регионе в результате трехдневного выпадения интенсивных осадков, предшествующих возникновению сильных эрозионных процессов, не уникальна. Подобные условия

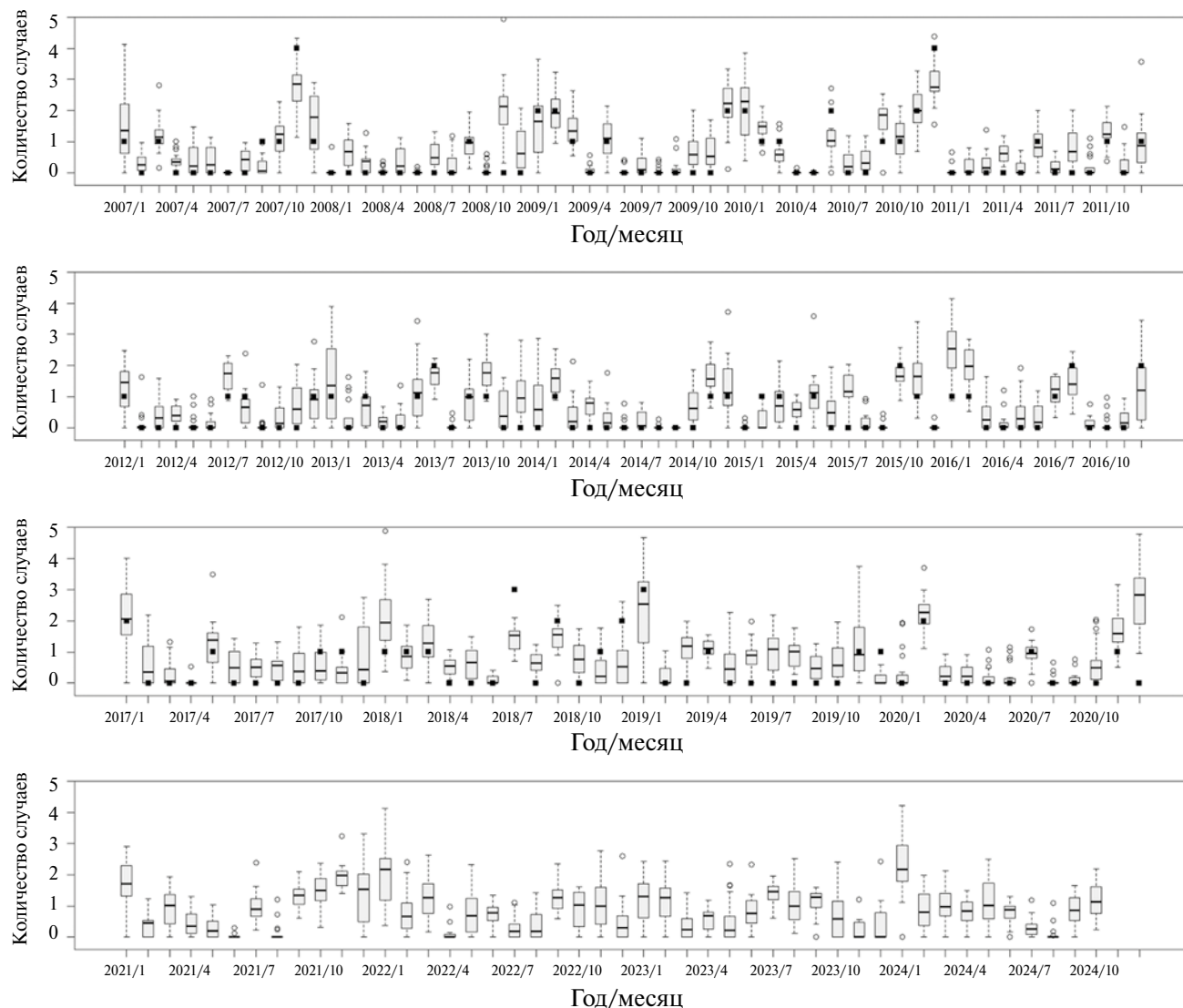


Рис. 5. Блочные диаграммы для 20 лучших результатов моделирования с заблаговременностью прогноза 3 месяца на контрольной выборке 2007–2024 гг. Рассчитанные по данным наблюдений случаи с осадками >40 мм за три последовательных дня показаны черными точками (по 2020 г.).

повторяются в межгодовом—междесятилетнем масштабе и требуют качественного прогнозирования.

Исследование возможности прогнозирования экстремальных осадков в горном Крыму с использованием разработанной авторами модели искусственной НС показало следующее: все аномальные месяцы, когда повторялось ≥ 3 случаев превышения порога 40 мм осадков за 3 последовательных дня, были спрогнозированы верно с заблаговременностью ≥ 3 мес. на контрольной выборке. 10 из 14 мес., когда наблюдалось 2 случая превышения порога 40 мм осадков

за 3 последовательных дня, были успешно спрогнозированы с заблаговременностью от 3 мес. Коэффициент корреляции и заблаговременность прогноза имеют обратную связь. Коэффициент корреляции убывает, а $RMSE/\sigma$ возрастает на контрольной выборке по мере удаления от тестовой выборки, что говорит о нестационарности модели. Отсюда возникает необходимость актуализации данных обучающей контрольной выборки пересчетом на последующие 5 лет.

По результатам исследования модели на контрольной выборке можно заключить, что она пригодна для контроля и предупреждения

опасных природных явлений (паводков, селей), обусловленных выпадением в течение 2–3 последовательных дней экстремальных осадков, с необходимостью пересчета вычислительного блока каждые 5 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алешина М.А., Семенов В.А.* Изменения характеристик осадков на территории России в XX–XXI вв. по данным ансамбля моделей CMIP6 // *Фундаментал. приклад. климатология*. 2022. Т. 8. № 4. С. 424–440.
2. *Воскресенская Е., Вышваркова Е.* Экстремальные осадки в Украине и глобальные климатические процессы. Saarbrücken: LAP LAMBERT Acad. Publ., 2014. 147 с.
3. *Гидрогеология СССР. Т. VIII. Крым* / Гл. ред. *А.В. Сидоренко*. М.: Недра, 1970. 364 с.
4. *Землянкова А.А., Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Федорова А.Д.* Моделирование формирования стока горной реки Дерекойки (полуостров Крым) // *Сбор. докл. междунаrod. науч. конф. памяти Ю.Б. Виноградова “Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению”* СПб., 2020. С. 78–83.
5. *Коваленко О.Ю., Бардин М.Ю., Воскресенская Е.Н.* Изменения характеристик экстремальности температуры воздуха в причерноморском регионе и их изменчивость в связи с крупномасштабными климатическими процессами межгодового масштаба // *Фундаментал. приклад. климатология*. 2017. Т. 2. С. 42–62.
6. *Куксина Л.В., Голосов В.Н., Жданова Е.Ю., Цыпленков А.С.* Гидролого-климатические факторы формирования экстремальных эрозионных событий в горном Крыму // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5, География*. 2021. № 5. С. 36–50.
7. *Лубков А.С., Воскресенская Е.Н., Марчукова О.В.* Новый подход к использованию нейронных сетей для долгосрочного прогноза Эль-Ниньо и Ла-Нинья // *Фундаментал. приклад. климатология*. 2023. Т. 9. № 4. С. 432–466. DOI: 10.21513/2410-8758-2023-4-432-466
8. *Лубков А.С., Воскресенская Е.Н., Сухонос О.Ю.* Прогноз выпадения осадков в районе Ай-Петри на основе модели искусственной нейронной сети // *Вод. ресурсы*. 2022. Т. 49. № 4. С. 517–526.
9. *Михайлов В.Н., Добролюбов С.А.* Гидрология. М.; Берлин: Директ-медиа, 2017. 753 с.
10. *Олиферов А.Н., Тимченко З.В.* Реки и озера Крыма. Симферополь: Доля, 2005. 216 с.
11. *Павлов И.Н.* Реки Крыма: русловые процессы и их экологическая оценка // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5, География*. 1994. № 3. С. 76–82.
12. Современное состояние береговой зоны Крыма / Под ред. *Ю.Н. Горячкина*. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2015. 252 с.
13. *Aksoy H., Dahamsheh A.* Artificial neural network models for forecasting monthly precipitation in Jordan // *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* 2009. V. 23. P. 917–931.
14. *Deo R.C., Şahin M.* Application of the artificial neural network model for prediction of monthly standardized precipitation and evapotranspiration index using hydrometeorological parameters and climate indices in eastern Australia // *Atmos. Res.* 2015. V. 161–162. P. 65–81.
15. *Haidar A., Verma B.* Monthly Rainfall Forecasting Using One-Dimensional Deep Convolutional Neural Network // *IEEE Access*. 2018. V. 6. P. 69053–69063.
16. *Hoefding W.* A non-parametric test of independence // *Annals of Mathematical Statistics*. 1948. V. 19. P. 293–325.
17. IPCC 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds *Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., Zhou B.* Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2021. In Press.
18. *Kendall M. G.* A new measure of rank correlation // *Biometrika*. 1938. V. 30. P. 81–93.
19. *Lu W., Chu H., Zhang Z.* Application of generalized regression neural network and support vector regression for monthly rainfall forecasting in western Jilin Province, China // *J. Water Supply: Res. Technol.-Aqua*. 2014. V. 64. № 1. P. 95–104.
20. *Maslova V.N., Voskresenskaya E.N., Lubkov A.S., Yurovsky A.V., Zhuravskiy V.Y., Evstigneev V.P.* Intense Cyclones in the Black Sea Region: Change, Variability, Predictability and Manifestations in the Storm Activity // *Sustainability*. 2020. V. 12. № 11. P. 4468.
21. *Mekanik F., Imteaz M.A., Gato-Trinidad S., Elmahdi A.* Multiple regression and Artificial Neural Network for long-term rainfall forecasting using large scale climate modes // *J. Hydrol.* 2013. V. 503. P. 11–21.
22. *Moustris K.P., Larissi I.K., Nastos P.T., Paliatso A.G.* Precipitation Forecast Using Artificial Neural Net-

- works in Specific Regions of Greece // *Water Resour. Manage.* 2011. V. 25. P. 1979–1993.
23. Nagahamulla H.R.K., Ratnayake U.R., Ratnaweera A. Monsoon rainfall forecasting in Sri Lanka using artificial neural networks // *Proc. 6th Int. Conf. Ind. Inf. Syst.* 2011. P. 305–309.
 24. Shukla R.P., Tripathi K.C., Pandey A.C., Das I.M.L. Prediction of Indian summer monsoon rainfall using Niño indices: A neural network approach // *Atmospheric Res.* 2011. V. 102. № 1–2. P. 99–109.
 25. Singh P., Borah B. Indian summer monsoon rainfall prediction using artificial neural network // *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* 2013. V. 27. P. 1585–1599.
 26. Voskresenskaya E., Vyshkvarkova E. Extreme precipitation over the Crimean peninsula // *Quaternary Int.* 2016. V. 409. P. 75–80.
 27. Vyshkvarkova E. Changes in extreme precipitation over the North Caucasus and the Crimean Peninsula during 1961–2018 // *IDŐJÁRÁS.* 2021. V. 125. № 2. P. 321–336.
 28. Vyshkvarkova E., Voskresenskaya E., Martin-Vide J. Spatial distribution of the daily precipitation concentration index in Southern Russia // *Atmospheric Research.* 2018. V. 203. P. 36 – 43. DOI: 10.1016/j.atmos-res.2017.12.003
 29. Zhang M., Su B., Nazeer M., Bilal M., Qi P., Han G. Climatic Characteristics and Modeling Evaluation of Pan Evapotranspiration over Henan Province, China // *Land.* 2020. V. 9. № 7. P. 229.
 30. Zhang X., Yang F. *RClimDex (1.0) User Guide.* Climate Research Branch Environment. Ontario: Climate Res. Branch Environ. Canada, 2004.

ON THE ISSUE OF FORECASTING CATASTROPHIC FLOODS IN THE TERRITORY OF CRIMEA

A. S. Lubkov, E. V. Vyshkvarkova*, E. N. Voskresenskaya, A. E. Shchodro

Institute of natural and technical systems, Sevastopol, 299011 Russia

*e-mail: aveiro_7@mail.ru

The catastrophic situations of recent years – in June 2021 in the Yalta region and in January 2024 in Sevastopol – associated with heavy precipitation, rising water levels in rivers and the formation of mudflows, once again demonstrated the need for an early forecast of events with extreme precipitation in Crimea for a timely response and minimization of economic losses. The region of mountainous Crimea with its complex terrain and large slopes is especially susceptible to the emergence of dangerous situations after heavy (often multi-day) rains. Based on daily precipitation data from the Ai-Petri meteorological station, cases with a precipitation amount of ≥ 40 mm over three consecutive days were calculated and analyzed. Such conditions were used in the analysis as a threshold for extreme precipitation leading to erosion of river beds in mountainous Crimea and the formation of mudflows. The situation of a catastrophic flood on the river Chernaya in January 2024 is considered, caused by extreme precipitation that fell over three days in the Sevastopol region. Then, for such a situation, a study was conducted on the possibility of forecasting them with a lead time of 3 months using the developed artificial neural network model. The results showed satisfactory quality of the developed neural network for forecasting with a lead time of 3 months of 2–3-day extreme precipitation that intensifies erosion processes in the mountainous Crimea.

Keywords: extreme precipitation, rivers of Crimea, neural network, seasonal forecast

УДК 556.5.01

ОЦЕНКА ИСПАРЕНИЯ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ПОЛИГОНАХ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА¹

© 2024 г. И. В. Землянов^{a, b}, А. А. Сапожникова^{a, b}, Е. А. Ракчеева^{a, b, *}, А. Е. Павловский^a

^aГосударственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Росгидромет, Москва, 119034 Россия

^bИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

*e-mail: lizaveta.r86@gmail.com

Поступила в редакцию 14.03.2024 г.

После доработки 15.04.2024 г.

Принята к публикации 15.04.2024 г.

Рассмотрены методы определения испарения с поверхности воды и почвы. Выполнены расчеты месячных величин испарения в пределах экспериментальных полигонов Крымского п-ова по данным измерений автоматизированных метеорологических комплексов за 2022–2023 гг. Результаты расчета испарения с поверхности водохранилищ сравнивались с величиной испарения, полученной методом наземных испарителей за отдельные месяцы. Расчет по формуле В.И. Мокляка показал наилучшее соответствие результатам, полученным на основе данных натурных наблюдений за испарением. Относительная погрешность определения испарения по рекомендуемому методу составляет 15%. Приведена оценка месячного испарения с почвы, определенного расчетными методами с использованием зависимостей от разных метеорологических факторов.

Ключевые слова: Крымский полуостров, водохранилище, испарение, экспериментальные полигоны, наземный испаритель, автоматическая метеостанция.

DOI: 10.31857/S0321059624060103 **EDN:** VOLBXF

ВВЕДЕНИЕ

Региональные особенности режима водных объектов Крымского п-ова и его уникальные природно-климатические условия представляют научный и практический интерес. Поскольку Крымский регион – самый водоемкий в России, существует необходимость проведения исследований по уточнению элементов водного баланса как отдельных водных объектов, в частности водохранилищ, так и их водосборных территорий и их влияния на безвозвратные потери воды.

Испарение – основная составляющая расходной части водного баланса водоемов и почв. Однако будучи очень важным элементом режима увлажнения в разных регионах ЕТР, особенно в тех, что испытывают дефицит во-

дных ресурсов, испарение остается наименее изученным элементом водного баланса. Это объясняется отсутствием данных натурных наблюдений в разных природных условиях. Стремительное сокращение количества станций водноиспарительной сети не позволяет надежно оценивать пространственное распределение испарения и решать практические задачи, связанные с оценкой обеспеченности водными ресурсами территорий в современных условиях [9]. Без данных натурных наблюдений за испарением невозможна оценка достоверности различных климатических и гидрологических моделей. Кроме того, эти данные необходимы при разработке и совершенствовании методов расчета испарения при отсутствии материалов наблюдений.

На территории Крыма действует только одна станция, проводящая наблюдения за испарением с водной поверхности, и она расположена в степной зоне Северо-Крымского района, который характеризуется засушливым климатом и отсутствием водно-ресурсного потенциала.

¹ Статья подготовлена в рамках работ государственного задания (тема 0126-2021 “Разработка методической базы и цифровых технологий поддержки принятия решений по обеспечению водной безопасности Крыма”).

С учетом вышесказанного становится ясно, что знание величин и сезонного хода годового испарения с поверхности водоемов и особенно — с поверхности сельскохозяйственных полей и водосборов крайне необходимо для решения многих водохозяйственных проблем.

В 2022–2023 гг. в рамках государственного задания выполнялись специализированные полевые работы по организации и проведению продолжительных непрерывных и периодических наблюдений за метеорологическими параметрами на экспериментальных полигонах региона.

Собранный и обработанный архив материалов наблюдений позволил дать оценку величине испарения с поверхности изучаемых водохранилищ и почв района исследований, полученных разными способами. На основе результатов сопоставления величин, рассчитанных по эмпирическим формулам, с данными натурных наблюдений был выбран расчетный метод определения испарения с водной поверхности. По результатам расчетов была проведена оценка влияния метеорологических факторов на испарение с поверхности почвы в разные сезоны года.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для проведения работ по определению величин испарения с водной поверхности и с поверхности почвы были назначены экспериментальные полигоны в пределах репрезентативных речных бассейнов, отражающих особенности формирования водных ресурсов в разных частях Крымского п-ова. Внимание было уделено бассейнам рек трех гидрографических районов, где сосредоточены основные ресурсы поверхностных вод Крыма: рек восточной части северного макросклона Крымских гор, впадающих в зал. Сиваш Азовского моря; рек западной части северного макросклона Крымских гор, впадающих в Черное море; рек южного макросклона Крымских гор, впадающих в Черное море. Экспериментальные полигоны охватывают территории, занимаемые соответственно Белогорским (р. Биюк-Карасу), Партизанским (р. Альма) и Изобильненским (р. Улу-Узень) водохранилищами. Районы исследования характеризуются

разными природно-климатическими и ландшафтными условиями.

На полигонах были организованы наблюдательные площадки, оснащенные автоматическими метеорологическими станциями (АМС) с комплектом датчиков “Davis Vantage Pro”, установленным на высоте 0.5 и 2.0 м над поверхностью почвы. Основные измеряемые метеорологические параметры следующие: температура и влажность воздуха, скорость ветра и количество осадков. Также на наблюдательных площадках были установлены испарители “ГГИ-3000”.

ИСПАРЕНИЕ С ПОВЕРХНОСТИ ВОДОХРАНИЛИЩ

Методы

Для оценки испарения с поверхности водоемов есть различные методы. Лучшие результаты дают расчеты, основанные на данных наблюдений за испарением, т. е. метод испарителей [2, 4]. Плавающий испарительный бассейн площадью 20 м² признан Всемирной метеорологической организацией временным эталоном, показания которого характеризуют реальное испарение с водоема в месте его установки [2]. В работах [3, 4, 7] установлено, что, помимо плавучего испарительного бассейна, наиболее близкие к реальному испарению с поверхности водоема — показания плавучих испарителей “ГГИ-3000”, установленных на специальных платформах. Однако наиболее часто используемый прибор на наблюдательной сети — наземный испаритель “ГГИ-3000”, но показания наземного испарителя не дают конечного результата испарения с поверхности водоема из-за погрешностей, связанных с конструкцией прибора и разницей гидрометеорологических условий над испарителем и над водоемом. Для перехода от показаний наземного испарителя к величинам реального испарения с водоема есть несколько методик [1–4]. Метод испарителей позволил в количественной форме исследовать многие важнейшие закономерности испарения с поверхности водоемов, знание которых помогло обосновать эмпирические формулы для расчета испарения.

Эмпирические формулы получили наибольшее распространение при оценке испарения

с поверхности водоемов. В подавляющем большинстве они относительно просты и основаны на использовании данных стандартных наблюдений на сети метеостанций. Однако материалы, используемые при выводе формулы, часто определяют ее региональный характер.

Величина испарения с поверхности водоема может быть определена и методами водного и теплового балансов, по методу турбулентной диффузии. Эти методы имеют достаточно строгую физическую основу, однако из-за недостаточности исходных натурных данных точные решения уравнений часто заменяются упрощенными эмпирическими и полуэмпирическими выражениями, которые применяются для приближенных оценок испарения за длительные периоды времени.

Испарение с поверхности Белогорского, Изобильненского и Партизанского водохранилищ рассчитывалось методом испарителей за отдельные периоды, в течение которых проводились экспедиционные работы. Величины испарения за месяц по испарителям “ГГИ-3000” восстанавливались по измеренным АМС метеоданным в соответствии с [9]. Далее переход от показаний испарителя “ГГИ-3000” к средним месячным величинам испарения с поверхности водохранилищ проводился по формуле В.С. Голубева и А.П. Урываева [4]. Таким образом было рассчитано испарение с поверхности Белогорского водохранилища за июнь, август, ноябрь 2022 г. и май, октябрь 2023 г.; Изобильненского и Партизанского водохранилищ – за август, ноябрь 2022 г. и май, октябрь 2023 г. Полученные результаты расчета испарения с поверхности водохранилищ методом испарителей приняты за основу для дальнейшего выбора наиболее подходящих эмпирических формул.

Эмпирические формулы, которые использовались для расчета испарения с поверхности водохранилищ, можно разделить на три группы.

К первой группе можно отнести формулы, в которых использовались только стандартные метеорологические данные, получаемые на метеостанциях. К ним относятся формулы А. Мейера, Мейера–Тихомирова, Б.В. Полякова, В.К. Да-

выдова (как для суточного, так и для месячного испарения), В.И. Мокляка [8, 10, 11]. В этих формулах испарение связано с дефицитом влажности воздуха и скоростью ветра. Также к этой группе относятся и формулы Н.И. Иванова и Иванова–Молчанова, где для расчета испарения использовались температура воздуха и относительная влажность воздуха.

Вторая группа формул основана на величинах, которые получены с помощью специальных наблюдений или путем расчета. В эту группу входят формулы Б.Д. Зайкова, Браславского–Викулиной [8] и полученная на их основе формула ГГИ, приведенная в [16]. Здесь использовались максимальная упругость водяного пара, вычисленная по температуре поверхности воды в водохранилищах, средние значения абсолютной влажности воздуха и скорости ветра над водохранилищами. Для Белогорского водохранилища испарение по формуле ГГИ определено двумя способами: традиционным, когда входящие в формулу величины рассчитывались по [16] по данным Белогорской селестоксовой станции, и по измеренным параметрам с допущением, что они могут быть распространены на все водохранилище.

Расчет испарения по формулам третьей группы основан одновременно и на стандартных данных, и на данных специальных наблюдений. К этой группе можно отнести формулы Крицкого–Менкеля–Россинского, Пенмана [8].

С помощью наиболее простых и нетребовательных к наличию специфических исходных данных эмпирических формул первой группы рассчитаны величины испарения за наибольшее количество месяцев. Расчеты по формулам второй и третьей групп (Пенмана и ГГИ) затруднены отсутствием продолжительного ряда наблюдений за температурой воды в водохранилищах.

Результаты

Вычисленные по всем перечисленным выше формулам величины испарения с поверхности исследуемых водохранилищ сравнивались с результатами расчетов по методу испарителей (табл. 1). Худшие результаты показали формулы

Таблица 1. Рассчитанное различными методами испарение с поверхности Белогорского водохранилища (мм) в 2022 г.

Формула	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Метод испарителей			110		110			41	
Мейера	78	81	95	124	92	89	47	31	19
Мейера–Тихомирова	61	64	75	97	72	70	37	24	15
Полякова	61	60	66	79	64	64	42	31	23
Давыдова для суточного испарения (полная)	59	63	67	90	71	67	42	28	20
Давыдова для суточного испарения (сокращенная)	66	81	89	120	97	86	53	36	24
Давыдова для месячного испарения (полная)	52	55	63	78	62	59	36	26	17
Давыдова для месячного испарения (сокращенная)	69	79	93	116	94	86	52	37	24
Мокляка	67	81	96	117	97	90	58	43	27
Иванова	74	92	104	136	102	98	58	36	21
Иванова–Молчанова	59	73	83	109	81	79	46	29	17
ГГИ по измерениям				57	60	42	50	28	
ГГИ по расчетам			124	151	132	153	100	60	
Пенмана				95	104	96	82	42	

Б.В. Полякова, Мейера–Тихомирова, Иванова–Молчанова, полные формулы В.К. Давыдова (как для суточного, так и для месячного испарения) и формула ГГИ. Они значительно занижают месячные величины испарения, расхождения доходят до 50%. Формула А. Мейера лучше зарекомендовала себя для Изобильненского водохранилища (расхождения 1–23%), в отличие от Белогорского и Партизанского водохранилищ (8–38%).

Величины испарения для всех водохранилищ, рассчитанные по формулам Пенмана, В.И. Мокляка и Н.И. Иванова, имеют расхождение с методом испарителей на 1–14%. Для Изобильненского водохранилища также дают хорошие результаты сокращенные формулы В.К. Давыдова (как для суточного, так и для месячного испарения) – расхождение ≤12%.

Для дальнейшего анализа были выбраны результаты расчетов по формуле В.И. Мокляка как по наиболее подходящей для всех исследуемых водохранилищ, чаще используемой в данной области и не требующей специфических исходных данных (как, например, формула Пенмана).

Анализ результатов расчетов по формуле В.И. Мокляка показал, что величины испаре-

ния с поверхности исследуемых водохранилищ различаются (рис. 1). В основном испарение с поверхности Изобильненского водохранилища значительно превосходит величину испарения с других водохранилищ, так как для него характерны более высокая температура воздуха, меньшая относительная влажность и, как следствие, наибольший дефицит влажности. Особенно заметна разница в летние месяцы, когда испарение максимально. В весенний период разница между месячными величинами испарения с поверхностей исследуемых водохранилищ не столь велика.

Суммарное испарение с июля по ноябрь 2022 г. (период, когда наблюдения проводились одновременно на всех трех полигонах) составило 504 мм с поверхности Изобильненского водохранилища, 405 мм и 379 мм с поверхностями Белогорского и Партизанского водохранилищ соответственно. В 2023 г. суммарное испарение за февраль–май и июль–сентябрь составило 613 мм с поверхности Изобильненского водохранилища, 529 мм с поверхности Белогорского и 533 мм с поверхности Партизанского.

ИСПАРЕНИЕ С ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВЫ

Испарение с поверхности почвы, как и испарение с поверхности воды, представляет собой

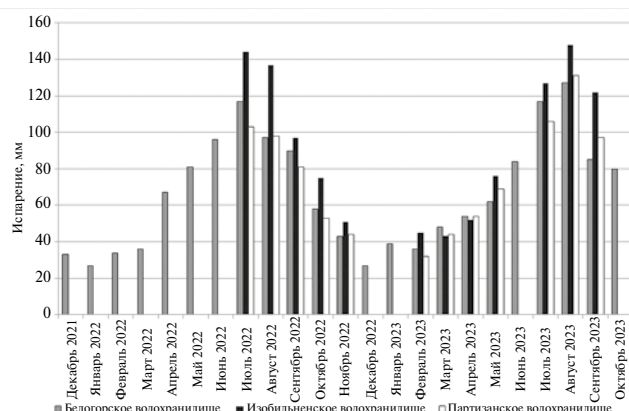


Рис. 1. Месячные суммы испарения с поверхности водохранилищ, вычисленные по формуле В.И. Мокляка.

одно из звеньев влагооборота. Влагооборот деятельной поверхности (верхнего слоя почвы) вместе с потоками тепла, проходящими через нее, — главный фактор, определяющий климатические особенности приземного слоя воздуха и верхних слоев почвы, так как вертикальные градиенты температуры и влажности в этих слоях прямо пропорциональны притоку тепла и парообразной влаги от деятельной поверхности в воздух или обратно [15].

Методы

Определение интенсивности испарения прямыми методами с помощью специальных приборов в регионе не проводится, а организация почвенно-испарительной площадки в рамках работ по государственному заданию нецелесообразна и, кроме того, технически неосуществима. Поэтому в настоящем исследовании применены некоторые доступные расчетные методы определения испарения с почвы, основанные на данных метеорологических наблюдений.

Испарение с поверхности почвы — более сложный процесс, чем испарение с водной поверхности, и зависит от многих факторов, главнейшие из которых — увлажненность почвенной поверхности и метеорологические условия над нею: интенсивность солнечной радиации, влажность и температура воздуха, скорость ветра [6].

Последнее определяет интенсивность турбулентного перемешивания, которое играет ве-

дущую роль в формировании микроклимата и посредством которого осуществляется передача водяного пара в воздухе. Вертикальный градиент влажности при заданных увлажненности и температуре подстилающей поверхности и вертикальный градиент температуры воздуха под влиянием солнечной радиации также, в свою очередь, воздействуют на интенсивность турбулентного перемешивания и тем самым на испарение.

Схема расчета испарения по данным наблюдений на разных высотах в температурно-неоднородной среде — основа метода турбулентной диффузии, предложенной А.Р. Константиновым [6, 8].

Для расчетов по этой схеме использовались данные наблюдений за температурой, влажностью и плотностью воздуха, скоростью ветра по шести срокам (1, 7, 10, 13, 16 и 19 ч) в период 2022–2023 гг. Градиенты температуры и влажности воздуха, а также скорости ветра рассчитаны по измеренным АМС элементам на высотах 0.5 и 2.0 м. Кроме того, при расчете влагообмена данным способом учитывался параметр шероховатости испаряющей поверхности. Значение коэффициента шероховатости зависит от вида подстилающей поверхности, и в данном расчете принят равным 3 см (средняя шероховатость луга).

Вертикальный поток водяного пара E (мм) за промежуток времени τ выражен формулой

$$E = 10\rho k_e \frac{\partial q}{\partial z} \tau, \quad (1)$$

где $\partial q / \partial z$ — градиент удельной влажности воздуха, 1/см; k_e — коэффициент обмена, см²/с.

Величина коэффициента обмена представлена так:

$$k_e = \gamma k \alpha_e = 0.63 \times 10^3 \alpha_e (u_2 - u_1), \quad (2)$$

$(u_2 - u_1)$ — градиент скорости ветра, м/с; α_e — безразмерный параметр, который рассчитывается так:

$$\alpha_e = 1 + 0.72 \left(\sqrt{1 - 28 \left(\frac{z_0}{z_{00}} \right) \text{Ri}_{1.0}} - 1 \right), \quad (3)$$

z_0 — коэффициент шероховатости, см; z_{00} — размерный коэффициент, равный 1 см; $Ri_{1.0}$ — число Ричардсона на высоте 1 м.

Ri — универсальный параметр, определяющий все основные свойства турбулентных процессов в температурно-неоднородной атмосфере [6]. От его величины непосредственно зависят значения коэффициентов α , k и γ .

$$Ri_{1.0} = -0.078 \frac{T_1 - T_2}{(u_2 - u_1)^2}, \quad (4)$$

$T_2 - T_1$ — градиент температуры воздуха, °С.

При сверхadiaбатической стратификации величина $Ri < 0$, а в инверсиях $Ri > 0$.

При равновесном вертикальном градиенте температуры профили всех метеорологических элементов над любыми видами подстилающей поверхности меняются с высотой по логарифмическому закону. Поэтому при расчете k_e вводится поправочный коэффициент γ , характеризующий отличие естественных профилей метеозаэментов от логарифмических:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt[4]{1 - Ri_{1.0}}}. \quad (5)$$

$\partial q / \partial z$ при расчетах испарения по методу турбулентной диффузии рассчитывался по формуле

$$\frac{\partial q}{\partial z} = 0.45 \times 10^{-5} \gamma (e_1 - e_2), \quad (6)$$

где $(e_1 - e_2)$ — градиент упругости водяного пара, гПа.

Имея величину плотности воздуха, измеряемую АМС, и принимая промежуток времени, за который рассчитывается влагообмен: $\tau = 3.6 \times 10^3$ с, — определяется интенсивность испарения по формуле (1).

Расчет суточного испарения по данным срочных наблюдений сводится к нахождению их суммы:

$$E_{\text{сут}} = 3(E_7 + 1.06E_{10} + 1.10E_{13} + 1.06E_{16} + E_{19}). \quad (7)$$

Интенсивный перенос водяного пара в верхние слои воздуха происходит в дневные часы при сверхadiaбатической стратификации атмосферы

в сроки 10, 13 и 16 ч. Сильный ветер в отдельные даты (при больших положительных значениях градиента скорости) в условиях температурной инверсии также способствует турбулентному перемешиванию объемов воздуха и переносу водяного пара в верхние слои. В случае когда скорость ветра снижена до 0 м/с, градиент влажности воздуха отрицательный, а состояние атмосферы устойчивое в температурном отношении, что характерно для ночного времени суток, перемещение воздушных слоев отсутствует и процесса испарения или обратного ему процесса конденсации не происходит.

Расчеты по методу турбулентной диффузии очень трудоемкие. Поэтому в настоящем исследовании также рассмотрен предложенный А.Н. Постниковым (Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург) легкий и доступный способ определения испарения с почвы в теплую часть года. Метод автора основан на связи испарения со среднесуточным дефицитом влажности воздуха и учете количества и распределения осадков в расчетный период [13, 14].

В основе метода — зависимость следующего вида:

$$E = K(w)E_0, \quad (8)$$

где E — испарение; $K(w)$ — функция от влажности почвы; E_0 — испаряемость.

Методы водного и теплового баланса, а также комплексные методы расчета испарения требуют значительного количества исходных данных и достаточно трудоемки при определении $K(w)$. В данном методе параметр влажности представлен так:

$$K(w) = \frac{140 - \sum E_{i-1} + \sum P_{i-1} + P_i}{140}, \quad (9)$$

где $\sum E_{i-1}$ и $\sum P_{i-1}$ — соответственно суммы испарения и осадков от даты начала расчета в данном теплом периоде до начала расчетного (i -го) интервала времени; P_i — сумма осадков за расчетный интервал времени i [12].

Константа 140 представляет собой предельное значение слоя влаги (мм), которая может

испариться из почвы за продолжительное время без осадков. Величина постоянной определена по материалам наблюдений на почвенно-испарительных площадках воднобалансовых станций лесной, лесостепной и степной зон за засушливые периоды 1970-х гг. [14]. Полученные на станциях результаты мало отличались друг от друга, поэтому величина 140 мм была использована А.Н. Постниковым при апробации своего метода. Расчеты испарения в настоящей работе также основаны на результатах прошлых исследований.

Расчет по формулам (8) и (9) начинается с начала первого месяца теплого периода (месяц, средняя температура за который не отрицательна) с учетом того, что общий запас влаги в первом метровом слое почвогрунтов вскоре после схода снежного покрова ежегодно считается равным наименьшей влагоемкости.

Результаты работ А.Н. Постникова (1974 г.) и А.М. Алпатьева (1954 г.) показывают, что испарение с обильно увлажненной почвы как в ранний весенний период, когда испарение за счет транспирации пренебрежимо мало, так и позже в условиях развитой транспирации довольно тесно связано с дефицитом влажности воздуха [14]. Поэтому значение E_0 для первого месяца теплого периода, а также после первого октября определяется по формуле $E_0 = 0.44\Sigma d$, а за остальные месяцы – по формуле $E_0 = 0.65\Sigma d$.

Результаты

Результаты расчета интенсивности испарения по методу турбулентной диффузии на Белогорском, Изобильненском и Партизанском полигонах за отдельные месяцы 2022–2023 гг. приведены на рис. 2.

Расчеты потоков влаги в приземном слое воздуха на экспериментальных полигонах показали, что в течение суток активно преобладают процессы испарения, что в большей степени характерно для летних месяцев, а процессы конденсации очень редки. Величина потоков влаги, направленных от почвы к атмосфере в летние месяцы, по данным суточных расчетов, в несколько раз превышает величину обратных потоков. Для

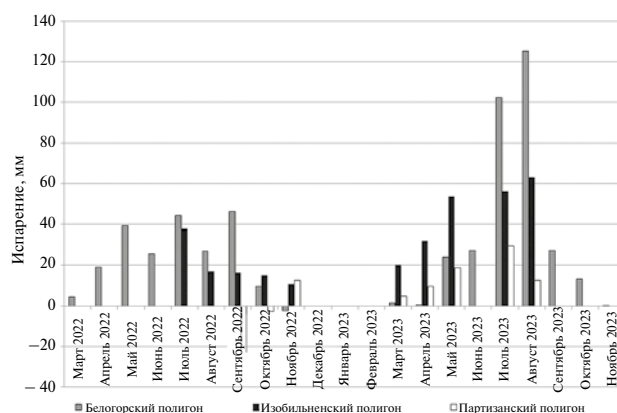


Рис. 2. Месячное испарение с деятельной поверхности экспериментальных полигонов (метод турбулентной диффузии).

осеннего и весеннего сезонов характерно чередование процессов испарения и конденсации в течение месяца. Очевидно, в отдельных случаях суммарная месячная величина потока влаги будет иметь отрицательные значения. Так, например, сочетание ряда метеорологических факторов в сентябре 2022 и 2023 гг. на Партизанском полигоне способствовало перемещению потока влаги из атмосферы к почве (рис. 2), т. е. преобладанию процессов конденсации.

В величинах месячного испарения, представленных на графиках, видны кардинальные отличия между полигонами за совместные периоды расчета. Это связано со сложным процессом формирования гидрометеорологических условий в разных районах исследования и с местоположением метеорологических комплексов, а кроме того, с различными типами почв и характером растительного покрова. К примеру, несмотря на то, что ветровой режим на Изобильненском полигоне отличался большой величиной градиента скорости, температурный градиент и режим увлажнения приземного слоя воздуха в совокупности далеко не всегда способствовали более интенсивному испарению, чем на Белогорском полигоне. Резкое увеличение интенсивности испарения в июле–августе 2023 г. вызвано высокими градиентами скорости ветра и парциального давления на фоне сверхадиабатической температурной стратификации. Небольшая величина испарения с почвы и соразмерная ей величина конденсации на Партизанском полигоне обу-

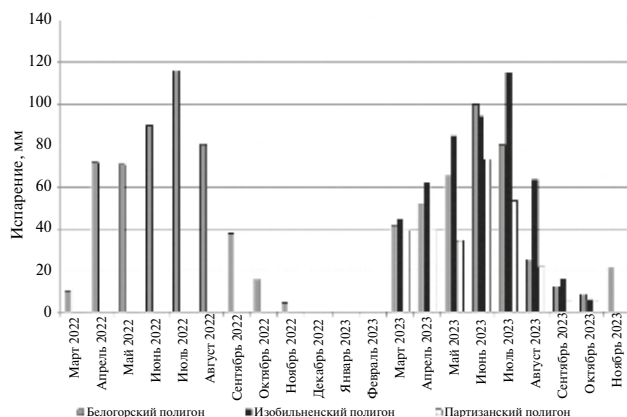


Рис. 3. Месячное испарение с деятельной поверхности экспериментальных полигонов (метод А.Н. Постникова).

словлены малыми скоростями ветра и нулевым градиентом большую часть времени, что в значительной степени обусловлено местоположением измерительного комплекса.

Недостаток этого метода — то, что он не учитывает степень увлаженности почвы. Картину расчетов по испарению могли бы дополнить расчеты потока влаги в слое почвы, для чего необходимы данные температуры почвы на горизонтах и относительной влажности почвы, определение которой с требуемой периодичностью было технически неосуществимо.

Определение испарения по методу А.Н. Постникова выполнялось с использованием усовершенствованного варианта расчета с помощью программы, написанной на языке C++, так как расчеты “вручную” — очень сложная и трудоемкая задача [13]. В качестве данных для расчета испарения использовались средние за месяц значения дефицита влажности воздуха и ежедневные данные по осадкам за расчетный период — теплую часть года. Расчетные периоды 2022–2023 гг. для определения испарения на экспериментальных полигонах охватывают в целом период с марта по ноябрь. Даты начала расчета устанавливались на основе данных измерений температуры воздуха и показаний влажности почвы на АМС. Полученные месячные величины испарения на Белогорском, Изобильненском и Партизанском полигонах представлены на рис. 3.

Ввиду отсутствия данных измерений на АМС Изобильненского и Партизанского полигонов в первой половине 2022 г. испарение в этих районах рассчитано только за 2023 г. Это обстоятельство свидетельствует о главном недостатке данного метода, поскольку здесь расчет всегда начинается с раннего весеннего времени.

Результаты расчета 2023 г. показали, что величина испарения с почвы в разных районах Крымского п-ова различна. С марта по ноябрь 2023 г. слой испарившейся воды с деятельной поверхности Белогорского полигона равен 390 мм, Изобильненского полигона — 490 мм, Партизанского полигона — 272 мм.

Согласно материалам Климатического атласа Крыма поле значений испарения с почвы, осредненных за многолетний период, для рассматриваемой территории укладывается в пределы 350–450 мм [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты расчета испарения с поверхности Белогорского, Изобильненского и Партизанского водохранилищ различными методами сравнивались с величиной испарения, полученной методом наземных испарителей за отдельные месяцы. Расчет по формуле В.И. Мокляка показал наилучшее соответствие результатам, полученным на основе данных натурных наблюдений. Относительная погрешность определения испарения по данному методу $\leq 15\%$. Ввиду наличия пропусков в рядах данных измерений АМС на Изобильненском и Партизанском полигонах величина годового испарения с водной поверхности (март–ноябрь) получена для Белогорского водохранилища и составила 685 мм в 2022 г. и 660 мм в 2023 г. Данный результат соответствует диапазону величин испарения, осредненных за многолетний период для территории Крымского п-ова [5].

Сравнение результатов расчета испарения с поверхности почвы, полученных методом турбулентной диффузии и методом А.Н. Постникова, показало расхождения значений как месячных, так и за расчетные периоды. Очевидно, это связано с использованием в расчетах совокупностей разных метеорологических параметров. Другими

возможными причинами расхождений результатов могут быть неудачное расположение АМС, а также некоторые допущения при расчетах по методу Постникова, возможность применения которого находится под вопросом ввиду климатических и ландшафтных условий исследуемого региона.

Сопоставление полученных по двум методам величин испарения в 2022 и 2023 гг. представилось возможным только на Белогорском экспериментальном полигоне. Испарение с почвы за теплую часть года, рассчитанное по методу турбулентной диффузии, составляет 320 и 220 мм соответственно, а по эмпирическому методу А.Н. Постникова — 490 и 390 мм.

Ввиду того, что метод турбулентной диффузии основан на вертикальном обмене масс, т. е. наличии вертикальных градиентов температуры и влажности воздуха, главным образом — положительного градиента скорости ветра, расчет испарения в некоторые сроки, особенно в ночное время суток, при отсутствии движения воздуха, невозможен. Расчеты испарения в эти сроки проводятся по методу теплового баланса, который учитывает радиационный баланс и влагообмен в почве, зависящий от температуры и влажности почвы в слое. Такие расчеты достаточно трудоемки, а в условиях настоящего исследования невозможны. Поэтому с учетом условий применения метода турбулентной диффузии можно сделать вывод о том, что рассчитанная по нему величина испарения занижена. Стоит отметить, что при расчете по данному методу наблюдается устойчивая корреляционная зависимость ($R \sim 0.9$) между месячными значениями испарения и среднемесячным дефицитом влажности воздуха.

Оценка величин испарения по методу А.Н. Постникова, напротив, дает основания полагать, что значения 400–500 мм — завышенный результат, потому что расчетная формула метода напрямую учитывает величину слоя выпадающих осадков, которые она “испаряет”, но не водно-физические свойства почвы.

Оценка величин испарения с почвы за расчетные периоды — теплую часть года и отдельные месяцы — показала необходимость проведения

дальнейших исследований и более детальных расчетов. Это особенно важно с учетом невозможности определения величины испарения прямыми методами посредством специализированных наблюдений.

Проведенное исследование показало, что на сравнительно небольшой территории Крымского п-ова распределение испарения неравномерно, что обусловлено разными сочетаниями определяющих его факторов: гидрометеорологическими характеристиками, особенностями рельефа и окружающего ландшафта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вуглинский В.С. Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 222 с.
2. Вуглинский В.С., Албул И.П. Методика расчета испарения с водной поверхности по данным наземных испарителей ГГИ-3000 // Вестн. СПбГУ. Сер. 7. 2016. Вып. 3. С. 118–128.
3. Вуглинский В.С., Старовойтова В.К., Черская Е.Н. О методике оценки испарения с поверхности водоема по данным континентального испарителя ГГИ-3000 // Тр. ГГИ. 1981. Вып. 274. С. 53–72.
4. Голубев В.С., Урываев А.П. Метод водных испарителей и его применение для расчета испарения с поверхности водоемов // Тр. ГГИ. 1983. Вып. 289. С. 69–76.
5. Климатический атлас Крыма. Приложение к научно-практическому дискуссионному сборнику “Вопросы развития Крыма”. Симферополь: Таврия-Плюс, 2000. 120 с.
6. Константинов А.Р. Испарение в природе. Издание второе. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 532 с.
7. Кузнецов В.И. Методика расчета испарения с бассейнов площадью 20 м² по наблюдениям в испарителях ГГИ-3000 // Тр. ГГИ. 1970. Вып. 181. С. 3–32.
8. Материалы Межведомственного совещания по проблеме изучения и обоснования методов расчета испарения с водной поверхности и суши, 1965. Валдай, 1966. 375 с.
9. Научно-прикладной справочник: Многолетние изменения испарения на Европейской территории России по данным водноиспарительной сети. СПб.: РИАЛ, 2021. 64 с.
10. Одрова Т.В. Гидрофизика водоемов суши. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 311 с.

11. Поляков Б.В. Гидрологический анализ и расчеты. Л.: Гидрометеиздат, 1946. 480 с.
12. Постников А.Н. Метод определения испарения с поверхности суши в лесной, лесостепной и степной зонах России за месяцы теплого периода года // Международ. науч.-исследовател. журн. 2021. № 4–2 (106). С. 14–18.
13. Постников А.Н. Метод расчета испарения с поверхности суши за теплый период года в различных природных зонах // Евразийское науч. объединение. 2018. № 11 (45). С. 156–160.
14. Постников А.Н. Метод расчета испарения с почвы в различных природных зонах // Уч. зап. РГГМУ. 2009. № 10. С. 21–31.
15. Сапожникова С.А. Микроклимат и местный климат / Под ред. И.А. Гольцберг. Л.: Гидрометеиздат, 1950. 242 с.
16. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 84 с.

EVAPORATION ASSESSMENT BASED ON MEASUREMENT DATA AT EXPERIMENTAL SITES ON THE CRIMEAN PENINSULA

I. V. Zemlyanov^{a, b}, A. A. Sapozhnikova^{a, b}, E. A. Rakcheeva^{a, b, *}, A. E. Pavlovskii^a

^a*Zubov's State Oceanographic Institute, Moscow, 119034 Russia*

^b*Water Problems Institute, Moscow, 119333 Russia*

^{*}*e-mail: lizaveta.r86@gmail.com*

The methods for determining evaporation from the surface of water and soil are considered. Calculations of monthly evaporation values within the experimental sites of the Crimean Peninsula were performed based on the measurement data of automated meteorological complexes for 2022–2023. The results of calculating evaporation from the surface of reservoirs were compared with the evaporation value obtained by the method of ground evaporators for individual months. The calculation using the formula of V.I. Moklyak showed the best agreement with the results obtained on the basis of in-situ observations of evaporation. The relative error in determining evaporation using the recommended method is 15%. An estimate of monthly evaporation from the soil is given, determined by calculation methods using dependencies on various meteorological factors.

Keywords: Crimean peninsula, reservoir, evaporation, experimental sites, ground evaporator, automatic weather station

УДК 556.3; 550.46; 551.50

О ФОРМИРОВАНИИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОД РЕК СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО СКЛОНА КРЫМСКИХ ГОР

© 2024 г. Е. П. Каюкова*

Санкт-Петербургский государственный университет,

Санкт-Петербург, 199134 Россия

**e-mail: epkayu@gmail.com*

Поступила в редакцию 31.03.2024 г.

После доработки 19.05.2024 г.

Принята к публикации 20.05.2024 г.

Изучены основные факторы формирования химического состава вод рек северо-западного склона Крымских гор, сделана оценка экологического состояния речных вод. Данные для представленной работы получены в результате летних полевых работ 2003–2022 гг. Химический состав рек не постоянен и варьирует в зависимости от метеоусловий конкретного года и антропогенного воздействия. Показано влияние геолого-гидрогеологических условий на состав макро- и микрокомпонентов в природных водах региона. Концентрации химических элементов в поверхностных водах бассейна р. Бодрак предлагается использовать в качестве естественных (фоновых) содержаний химических элементов, не затронутых антропогенным воздействием речных вод.

Ключевые слова: реки северо-западного склона Крымских гор, поверхностные воды, химический состав, диаграммы Гиббса, индексы насыщения, миграционные формы.

DOI: 10.31857/S0321059624060114 EDN: VOIUWO

ВВЕДЕНИЕ

Речная сеть Крымского п-ова развита крайне неравномерно, наибольшая густота характерна для Горного Крыма. Речной сток варьирует в зависимости от метеорологических условий года, в первую очередь от температуры приземного воздуха и количества атмосферных осадков. Почти все реки Крыма и их притоки зарегулированы водохранилищами, которые наполняются в основном осенними и зимними осадками (весенние паводки обеспечивают почти три четверти годового стока). Естественный сток заполняет водохранилища, и затем по мере необходимости эта вода подается в системы водоснабжения городов и населенных пунктов Крыма.

Систематические гидрохимические наблюдения на реках Крыма под патронажем Гидрометеорологической службы УССР начались в 1930-х гг. Первые обобщения выполнены О.А. Алекиным [23].

К настоящему времени накоплено достаточно данных о режиме малых рек Крыма, об основных видах их питания, общем химическом

составе и пр. Содержания микроэлементов в речных водах Крыма изучались не каждый год. В настоящей работе представлены данные по составу микрокомпонентов и их концентрациям в водах р. Бодрак (левого притока р. Альмы), полученные в период 2003–2010 гг. Воды этой реки минимально затронуты антропогенными загрязнениями, что позволяет показать их природный геохимический облик — определить исходные фоновые концентрации микроэлементов и других параметров.

Основная цель настоящей работы — показать гидрогеохимические особенности некоторых рек северо-западного склона Крымских гор с акцентом на р. Бодрак, представить естественные концентрации ряда элементов, которые можно принять за фоновые при изучении техногенной нагрузки поверхностных вод региона.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследования занимает северо-западные склоны Крымских гор, где расположены бассейны крупных рек полуострова — Бельбек, Кача, Альма, Западный Булганак (рис. 1).

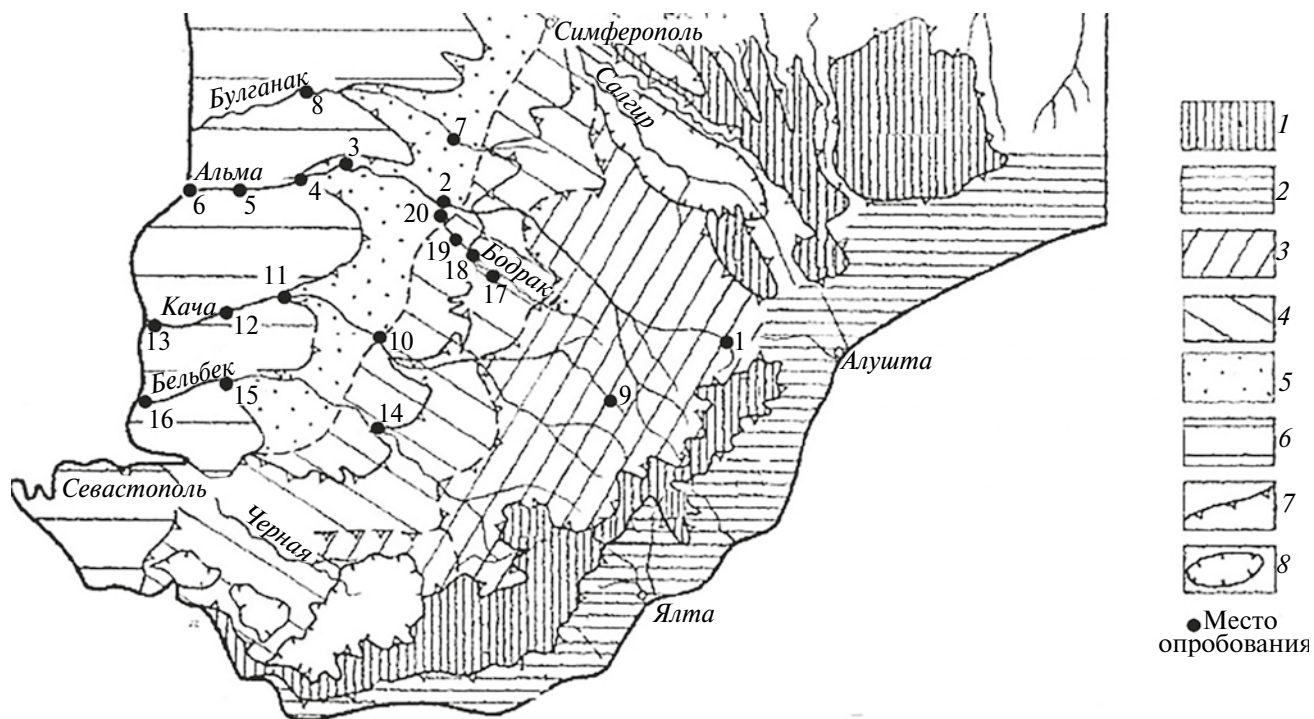


Рис. 1. Картограмма геоморфологического районирования [19]. 1 – Водораздельные плато Главной гряды; 2 – Южный склон Главной гряды (ЮБК); 3 – Южное эрозионно-денудационное межгрядовое понижение и северный склон Главной гряды Крымских гор; 4 – Внутренняя (Вторая) гряда гор; 5 – Северное эрозионно-аккумулятивное межгрядовое понижение; 6 – Внешняя (Третья) гряда гор; 7 – Эрозионные уступы прочных пород; 8 – Контуры эрозионных котловин.

Крымские горы представляют собой почти параллельные вытянутые с юго-запада на северо-восток гряды. Главная гряда, состоящая из ряда горных массивов (яйл) с водораздельными платообразными поверхностями, возвышается мощным уступом верхнеюрских известняков, в которых широко развиты многочисленные карстовые формы: воронки, поля, карры, поноры, пещеры. Две другие гряды – Внутренняя (мел-палеогеновая) и Внешняя (неогеновая) – имеют куэстовый рельеф. Такие формы рельефа предгорных гряд Внутренней (500–738 н. у. м) и Внешней (200–350 м н. у. м) образовались за счет полого наклоненных к северу прочных карбонатных пород, образующих бронирующие поверхности. Предгорные гряды разделены Северным эрозионно-аккумулятивным межгрядовым понижением, возникшим за счет размыва боковыми притоками (рис. 1).

Широкое пространство между Главной и Внутренней грядами гор – Южное эрозионно-денудационное межгрядовое понижение, в пределах которого сформировался сложнорасчлененный

овражно-балочный рельеф. На территории развиты водоупорные флишевые верхнетриасово-нижнеюрские отложения.

Истоки большинства рек северо-западных склонов формируются в горах на высотах 600–1100 м [4], где разгружается множество карстовых источников. Далее реки, прорезая Внутреннюю и Внешнюю гряды (теряя здесь часть стока), текут на запад и впадают в Черное море. На крымских яйлах речная сеть отсутствует, весь поверхностный сток переходит в подземный. Распределение стока в общем соответствует распределению атмосферных осадков, поскольку они основной источник питания крымских рек.

Геолого-гидрогеологические условия

Главная гряда Крымских гор – молодая сложнопостроенная гидрогеологическая область, сложенная смятыми в складки терригенными и карбонатными породами, в результате чего образовалась сложная система адмассивов и межгорных артезианских бассейнов. В массивах

верхнеюрских закарстованных известняков аккумулируются основные объемы пресных подземных вод полуострова, образованных за счет атмосферных осадков и частично конденсации. В основании залегают водоупорные флишевые отложения таврической серии (T_3-J_2).

В общих чертах Главная гряда служит внешней областью питания артезианских бассейнов Равнинного Крыма. Внутренняя и Внешняя гряды (через которые осуществляется транзитный сток подземных и поверхностных вод, сформированных в районе Главной гряды) выполняют роль внутренней области питания для артезианских бассейнов.

По долинам рек развиты аллювиальные отложения, представленные галечниково-песчаными и суглинисто-глинистыми образованиями. В верховьях рек это галечники и пески, образующие прослои или линзы различной мощности. В нижних течениях преобладают суглинки и глины, которые в устьях замещаются лиманно-морскими отложениями. По данным [4], мощность аллювиальных накоплений возрастает от верховьев к устьям. Так, в среднем течении рек Бельбек, Качи, Альмы мощность составляет 10–20 м, а в устьевых частях р. Качи – 30 м, р. Бельбек – 25 м.

Внутренняя (Вторая) предгорная гряда сложена моноклинально залегающими породами верхнего мела и палеоцена, с пологим (под углом 8–10°) падением к северо-западу и северу и по-

степенным переходом в зону второй продольной долины, где они перекрываются породами эоцена. Внешняя (Третья) предгорная куэстовая гряда бронируется сарматскими мергелисто-известняковыми породами, в основании которых залегает олигоценовая глинистая толща. Гряда вытянута в северо-восточном направлении параллельно Внутренней гряде.

При пересечении Второй и Третьей гряд, а также на участках, сложенных водопроницаемыми горными породами, реки северо-западного склона теряют значительное количество стока на инфильтрацию, пополняя запасы подземных вод. После выхода рек на равнину продольный профиль их выполаживается. В среднем и нижнем течении долины рек расширяются, а приустьевые их участки в ряде случаев могут быть заболочены.

На водоразделах рек Качи, Альмы, Булганак распространен водоносный комплекс в аллювиальных плиоцен-четвертичных отложениях. Водовмещающие породы – гравий, галька с суглинистым наполнителем, супесь, суглинки [6, 20].

На рис. 2 представлена гидрогеологическая карта Горного Крыма.

Климат

Климат полуострова формируется под влиянием акваторий Черного и Азовского морей,



Рис. 2. Гидрогеологическая карта Горного Крыма (по материалам листа L-36 ВСЕГЕИ, 1983 [6]).

солнечной радиации, ветрового переноса воздушных потоков при определяющей барьерной роли Главной гряды Крымских гор. Местные особенности подстилающей поверхности Горной части Крыма (рельеф, растительный покров, водотоки, озера и другие факторы) формируют мезоклиматы (местные климаты).

За последние 40 лет, по данным метеостанции г. Симферополя [21], среднегодовая температура приземного воздуха увеличивалась в среднем на 0.3°C каждые 5 лет, что связано с глобальными климатическими изменениями. И эта тенденция, вероятно, в ближайшие годы сохранится. Благополучные по водности годы (в результате колебаний увлажнения территории) случаются гораздо реже.

Крым отличается большой неравномерностью распределения атмосферных осадков. В холодный период года они связаны в основном с приходом циклонов с юго-запада (Средиземноморские циклоны), в меньшей степени с северо-запада (Атлантические циклоны) или при вхождении с северо-востока континентального воздуха (рис. 3). В теплые периоды на фоне общего снижения циклонической деятельности эта связь сохраняется. Количества поверхностных и подземных вод и их химический состав определяются режимом атмосферных осадков.

Реки северо-западного склона Крымских гор

Сток крымских рек подчиняется ландшафтно-климатической зональности. По данным [25], подземный сток рек северо-западного скло-

на Крымских гор составляет для Альмы – 36.5, Качи – 49.5, Бельбека – 65.4 тыс. м³/сут.

Истоки всех крупных рек северо-западного склона (за исключением р. Булганак) – на северо-западном склоне Главной гряды. В верхних течениях они имеют значительные уклоны. Так, падение речного русла рек Качи – 9.8, Альмы – 7.3, Бельбек – 6.0 м/км [4]. Все реки отличаются полноводностью в зимне-весенний период во время паводков. Регулирование стока рек водохранилищами невелико – 6–9% годового стока, или 25–35% воды, протекающей за вегетационный период [4].

В верхнем течении реки питаются водами, сформированными в закарстованных массивах верхнеюрских известняков, в основании которых разгружаются мощные источники, которые и дают начало рекам Крыма. Минерализация таких источников 0.5–0.7 г/л, в ионном составе преобладают гидрокарбонаты и кальций.

В нижнем течении реки северо-западных склонов Крымских гор протекают по сильно преобразованной в результате деятельности человека территории, достаточно хорошо освоенной предприятиями агропромышленного комплекса, и это отражается на химическом составе речных вод.

Воды грунтового стока, которые образуются в период весенних паводков, после разморозки почвенного покрова и в период летних дождей имеют более высокую минерализацию. В ион-



Рис. 3. Основные переносы воздушных масс (слева), роза ветров для города Симферополя (справа).

но-солевом составе заметно увеличивается содержание сульфатов [26]. На рис. 4 показано гидрохимическое районирование Горного Крыма [1, 23]. Наименование химического типа вод дано по преобладающим компонентам (как это принято в гидрогеологии). Изменения химического класса воды по сезонам объясняется тем, что в меженный период химический состав русловых вод формируется главным образом за счет подземных вод.

В табл. 1 представлены некоторые средние многолетние гидрохимические данные для основных рек северо-западного склона Крымских гор – Альмы и Качи. Для большинства рек Крыма наблюдается обратная зависимость степени минерализации воды от ее расходов [26].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходными данными для гидрохимической характеристики рек северо-западного склона Крымских гор послужили результаты химического анализа, полученные в летнем полевом сезоне 2009 г. Опробованы реки Бельбек, Кача, Альма, Булганак и Бодрак (приток Альмы) – всего 20 проб. Места отбора указаны на рис. 1. Изучение химического состава вод р. Бодрак проводится в рамках мониторинговых наблюдений и охватывает четверть века, однако опробования проводились только в летний период, что связано со сроками студенческой практики по геологическому картированию СПбГУ [10].

В первую очередь объемным (тетриметрическим) методом определялись главные ионы – Ca^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} и жесткость. Сумму

$\text{Na}^+ + \text{K}^+$ находили расчетным путем по разнице сумм концентраций анионов (мг-экв/л) и жесткости. Весовым методом в лаборатории кафедры гидрогеологии СПбГУ и методом турбидиметрии на портативном колориметре “DR/890 Nach” определяли SO_4^{2-} . В отдельные годы при изучении природных вод определяли микрокомпонентный состав вод (до 30 наименований) и основные катионы с использованием инструментальных методов: ICP AES (атомно-эмиссионный спектрометр “ICAP61E”) и ICP MS (масс-спектрометр “Agilent 7500”). Такого рода определения выполняли в лаборатории ГУП “Водоканал” или лаборатории ВСЕГЕИ. Пробы предварительно консервировали азотной кислотой (2%). Температура, pH, Eh, удельная электропроводность (УЭП) измерены с использованием портативных приборов фирмы “HANNA” непосредственно на месте отбора пробы.

Для оценки степени насыщенности природных вод основными пороодообразующими минералами проводили физико-химическое моделирование с помощью программного комплекса PHREEQC Interactive 2.15.0.

Методика оценки экологического состояния речных вод включала в себя сравнение физико-химических показателей воды с санитарными нормами [22, 24], а также изучение миграционных форм тяжелых металлов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты химического анализа речных вод северо-западных склонов Крымских гор пока-



Рис. 4. Гидрохимическое районирование Горного Крыма, по материалам [1, 23] (Здесь и далее: Мин-я – минерализация).

	Меженный период	Паводковый период
1	Гидрокарбонатно-кальциевые Мин-я 450-750 мг/л, Ж 5.2-7.0 мг-экв/л	Гидрокарбонатно-кальциевые Мин-я 300 мг/л, Ж 2.3-3.9 мг-экв/л
2	Гидрокарбонатно-кальциевые Мин-я 450-650 мг/л, Ж 5.5-9.2 мг-экв/л	Гидрокарбонатно-кальциевые Мин-я 250-350 мг/л, Ж 3.0-4.7 мг-экв/л
3	Сульфатно-гидрокарбонатные кальциевые Мин-я 750 мг/л, Ж 8.65 мг-экв/л Гидрокарбонатно-кальциевые Мин-я 1 г/л, Ж 10.5 мг-экв/л	Гидрокарбонатно-кальциевые Мин-я 200 мг/л, Ж 2.5 мг-экв/л Сульфатно-гидрокарбонатные кальциевые Мин-я 300 мг/л, Ж 3.3 мг-экв/л
4	Сульфатно-гидрокарбонатные кальциевые Мин-я 1 мг/л, Ж 7.7 мг-экв/л Хлоридно-сульфатные смешанного катионного состава Мин-я 1.7 г/л, Ж 21 мг-экв/л	Гидрокарбонатно-кальциевые Мин-я 350 мг/л, Ж 3.65 мг-экв/л Сульфатно-гидрокарбонатные кальциевые Мин-я 700 мг/л, Ж 6.85 мг-экв/л
5	Гидрокарбонатно-кальциевые Мин-я 160-450 мг/л, Ж 2.0-4.3 мг-экв/л Воды временных водотоков	Гидрокарбонатно-кальциевые Мин-я 160-450 мг/л, Ж 2.0-4.3 мг-экв/л Воды временных водотоков

Таблица 1. Средние многолетние концентрации ионов и минерализация воды некоторых рек северо-западных склонов Крымских гор, по [26] (Ж – жесткость воды)

Привязка	Ca ²⁺ , мг/л %эquiv.	Mg ²⁺ , мг/л %эquiv.	Na ⁺ +K ⁺ , мг/л %эquiv.	HCO ³⁻ , мг/л %эquiv.	SO ₄ ²⁻ , мг/л %эquiv.	Cl ⁻ , мг/л %эquiv.	Ж, мг-экв л	Мин-я, мг/л	Fe _{общ} , мг/л	NO ₃ ⁻ , мг/л	NO ₂ ⁻ , мг/л	NH ₄ ⁺ , мг/л
Период весеннего половодья												
р. Альма у вдхр Партизанского	<u>51.8</u> 64	<u>11.2</u> 23	<u>12.2</u> 13	<u>212.9</u> 69	<u>61.1</u> 25	<u>9.6</u> 6	3.5	352.2	0.02	0.49	0.006	0.094
р. Кача у села Баштановка	<u>60.9</u> 63	<u>12.8</u> 22	<u>16.3</u> 15	<u>193.9</u> 63	<u>79.2</u> 32	<u>8.8</u> 5	4.1	307.1	0.01	1.00	0.016	0.540
Летне-осенний период												
р. Альма у вдхр Партизанского	<u>71.3</u> 64	<u>14.8</u> 22	<u>17.9</u> 14	<u>249.5</u> 68	<u>78.6</u> 27	<u>9.5</u> 5	4.8	412.6	0.02	0.39	0.002	0.0
р. Кача у села Баштановка	<u>79.9</u> 68	<u>13.6</u> 19	<u>17.5</u> 13	<u>255.3</u> 68	<u>58.4</u> 20	<u>26.3</u> 12	5.1	480.6	0.02	1.43	0.003	0.008
Период зимней межени												
р. Альма у вдхр Партизанского	<u>68.3</u> 66	<u>13.5</u> 22	<u>13.9</u> 12	<u>255.0</u> 79	<u>41.8</u> 16	<u>8.9</u> 5	4.5	410.2	0.0	0.175	0.002	0.0
р. Кача у села Баштановка	<u>76.6</u> 69	<u>12.2</u> 18	<u>16.6</u> 13	<u>237.6</u> 68	<u>66.3</u> 24	<u>15.8</u> 8	4.8	390.1	0.01	1.17	0.003	0.187

заны в табл. 2 и на диаграмме А. Пайпера [29] (рис. 5). Опробование рек проводилось 22.07.2009. Для сравнения на диаграмме Пайпера приведены данные по химическому составу атмосферных осадков, которые были отобраны в летние сезоны 2005, 2006, 2010 гг. [12], поскольку первоначальный химический состав речных вод определяется составом атмосферных осадков. В дальнейшем происходит обогащение химического состава вод рядом макро- и микрокомпонентов (табл. 2) [8, 12] в результате поверхностного и подземного стока, инфильтрации осадков.

Почти все образцы атмосферных осадков и большинство точек, отражающих химический состав речных вод, расположились в области 1, что отвечает типу вод Ca–Mg–HCO₃. Четыре фигуративные точки из области 2 (тип Na–Cl–SO₄) описывают образцы р. Булганак, р. Качи в непосредственной близости моря и р. Альмы (Песчаное). Часть точек расположились в области смешанного типа Ca–Mg–SO₄–Cl.

Анализ данных химического состава вод рек северо-западного склона Крымских гор позволяет утверждать, что минерализация речных вод меняется в широких пределах, увеличиваясь по направлению с юго-востока на северо-запад (рис. 1; табл. 2). Для летнего периода минерализация меняется от 0.3 г/л в верховьях рек до 1 г/л

в нижнем течении. Это имеет как естественные, так и техногенные причины.

В верховьях рек (кроме р. Западный Булганак) в анионном составе доминируют гидрокарбонаты, в катионном – кальций, что характерно для верхнеюрского водоносного комплекса (состав представлен в табл. 2). Преодолевая Южное межгрядовое понижение (где развиты флишевые отложения таврической серии), речные воды обогащаются сульфат-анионом. Еще С.А. Альбов в [2] отметил, что повышенные содержания сульфатов в трещинных водах флишевых отложений таврической серии (относительно других подземных вод Горного Крыма) обязаны выветриванию серных колчеданов, не редких в таврических глинистых сланцах, а также окислению рассеянного в породе пирита и марказита.

В пробах, отобранных непосредственно при впадении реки в море (образец 13 р. Качи на рис. 5), предсказуемо на первое место в анионном составе выходит хлор, в катионном – натрий. Это связано со смешением морских и речных вод.

Истоки р. Западный Булганак формируются на склонах Внутренней гряды (юго-восточнее горы Таш-Джарган, 546 м н. у. м. [3]) в виде разгрузки небольших родничков и пластовых высачиваний.

Таблица 2. Химический состав речных вод северо-западного склона Крымских гор, 2009 г. (н.о. – не определялось; *T* – температура; УЭП – удельная электропроводность)

№ на рис.1	Дата отбора	Место отбора проб	Alt м	Ca ²⁺ мг/л %экв.	Mg ²⁺ мг/л %экв.	Na ⁺ +K ⁺ мг/л %экв.	HCO ₃ ²⁻ мг/л %экв.	SO ₄ ²⁻ мг/л %экв.	Cl ⁻ мг/л %экв.	CO ₃ ²⁻ мг/л %экв.	<i>T</i> °C	pH ед.	Eh мВ	УЭП мСм см	Мин-я мг/л
1	22.07	Альма, Форелевое хозяйство	548	<u>60.1</u> 49	<u>15.2</u> 20	<u>43.3</u> 31	<u>292.8</u> 84	<u>33.6</u> 12	<u>8.5</u> 4	0	15.7	8.0	н.о.	448	444.9
2	22.07	Альма, Но- вопавловка	184	<u>84.0</u> 43	<u>17.0</u> 14	<u>94.8</u> 43	<u>390.4</u> 66	<u>123.8</u> 26	<u>26.3</u> 8	0	24.1	8.2	52	816	736.3
3	22.07	Альма, Каштаны	77	<u>96.0</u> 46	<u>9.7</u> 8	<u>110.2</u> 46	<u>268.4</u> 42	<u>203.0</u> 41	<u>55.4</u> 15	<u>6.0</u> 2	22.3	8.4	27	902	748.7
4	22.07	Альма, Отрадное	48	<u>88.0</u> 47	<u>26.7</u> 24	<u>62.3</u> 29	<u>231.8</u> 41	<u>188.6</u> 42	<u>41.9</u> 13	<u>12.0</u> 4	23.9	8.5	46	896	651.4
5	22.07	Альма, Вилино	22	<u>92.0</u> 43	<u>12.2</u> 9	<u>117.1</u> 48	<u>280.6</u> 43	<u>192.5</u> 37	<u>66.7</u> 18	<u>6.0</u> 2	22.8	8.2	49	971	767.0
6	22.07	Альма, Песчаное	5	<u>88.0</u> 36	<u>9.7</u> 7	<u>158.0</u> 57	<u>305.0</u> 42	<u>210.7</u> 36	<u>95.1</u> 22	0	23.4	8.1	103	1074	866.6
7	22.07	Булганак, близ Трудо- любово	218	<u>112.0</u> 38	<u>14.6</u> 8	<u>180.8</u> 54	<u>353.8</u> 40	<u>312.0</u> 44	<u>83.8</u> 16	0	20.4	8.0	79	1246	1056.9
8	22.07	Булганак, Кольчугино	74	<u>120.0</u> 44	<u>7.3</u> 5	<u>160.5</u> 51	<u>292.8</u> 35	<u>270.7</u> 42	<u>111.5</u> 23	0	22.1	8.2	78	1170	962.8
9	23.07	Кача, верховья	1035	<u>70.1</u> 86	<u>3.0</u> 6	<u>8.0</u> 8	<u>195.2</u> 83	<u>21.0</u> 12	<u>7.1</u> 5	0	6.7	8.1	н.о.	303	299.97
10	22.07	Кача, близ Бахчисарая	105	<u>60.0</u> 50	<u>17.0</u> 23	<u>37.5</u> 27	<u>244.0</u> 66	<u>76.3</u> 27	<u>15.6</u> 7	0	25.1	8.5	45	535	450.4
11	22.07	Кача, Красные Зори	50	<u>116.0</u> 60	<u>17.0</u> 15	<u>55.9</u> 25	<u>244.0</u> 43	<u>173.3</u> 39	<u>57.5</u> 18	<u>12.0</u> 4	24.4	8.7	38	988	675.7
12	22.07	Кача, Вишневое	14	<u>108.0</u> 53	<u>26.7</u> 21	<u>62.3</u> 26	<u>244.0</u> 39	<u>174.2</u> 35	<u>80.9</u> 22	<u>12.0</u> 4	23	8.4	62	1018	708.2
13	22.07	Кача у Черного моря	0	<u>120.0</u> 32	<u>19.4</u> 8	<u>263.4</u> 60	<u>292.8</u> 25	<u>196.3</u> 22	<u>346.5</u> 51	<u>12.0</u> 2	н.о.	8.3	65	1898	1250.4
15	22.07	Бельбек у горы Крокодил	170	<u>56.0</u> 53	<u>14.6</u> 23	<u>28.3</u> 24	<u>244.0</u> 76	<u>47.5</u> 19	<u>8.5</u> 5	0	24.4	8.5	22	424	398.9
14	22.07	Бельбек, Верхне- садовое	50	<u>68.0</u> 57	<u>9.7</u> 13	<u>40.9</u> 30	<u>231.8</u> 64	<u>66.2</u> 23	<u>21.3</u> 10	<u>6.0</u> 3	23.8	8.5	46	547	444.0
16	22.07	Бельбек, Любимовка	3	<u>68.0</u> 60	<u>9.7</u> 14	<u>33.1</u> 26	<u>207.4</u> 60	<u>67.2</u> 25	<u>19.2</u> 10	<u>9.0</u> 5	23.1	8.5	33	546	413.6
17	05.08	Бодрак у Тешиного моста	250	<u>56.1</u> 36	<u>32.2</u> 34	<u>53.6</u> 30	<u>256.2</u> 54	<u>139.6</u> 38	<u>21.3</u> 8	0	16.4	8.0	н.о.	593	426.70
18	22.07	Бодрак, Трудолю- бовка	243	<u>88.0</u> 52	<u>7.3</u> 7	<u>80.7</u> 41	<u>305.0</u> 59	<u>132.0</u> 32	<u>19.9</u> 7	<u>6.0</u> 2	н.о.	8.4	30	721	638.9
19	22.07	Бодрак, Скалистое у моста	207	<u>76.0</u> 54	<u>4.9</u> 6	<u>66.0</u> 40	<u>268.4</u> 62	<u>104.2</u> 31	<u>17.8</u> 7	0	22.9	8.5	43	580	537.2
20	22.07	Бодрак у Альмы	165	<u>132.0</u> 64.5	<u>24.3</u> 19.5	<u>37.7</u> 16.0	<u>402.6</u> 64	<u>135.4</u> 28	<u>25.6</u> 7	<u>3.0</u> 1	19	8.3	42	901	760.5
21	14.07	Дождь, 9 мм осадков*	271	<u>2.0</u> 27	<u>0.2</u> 4	<u>6.0</u> 69	<u>14.6</u> 63	<u>5.8</u> 32	<u>0.7</u> 5	0	–	8.9	40	17	29.3

*По данным метеостанции п. Почтового.

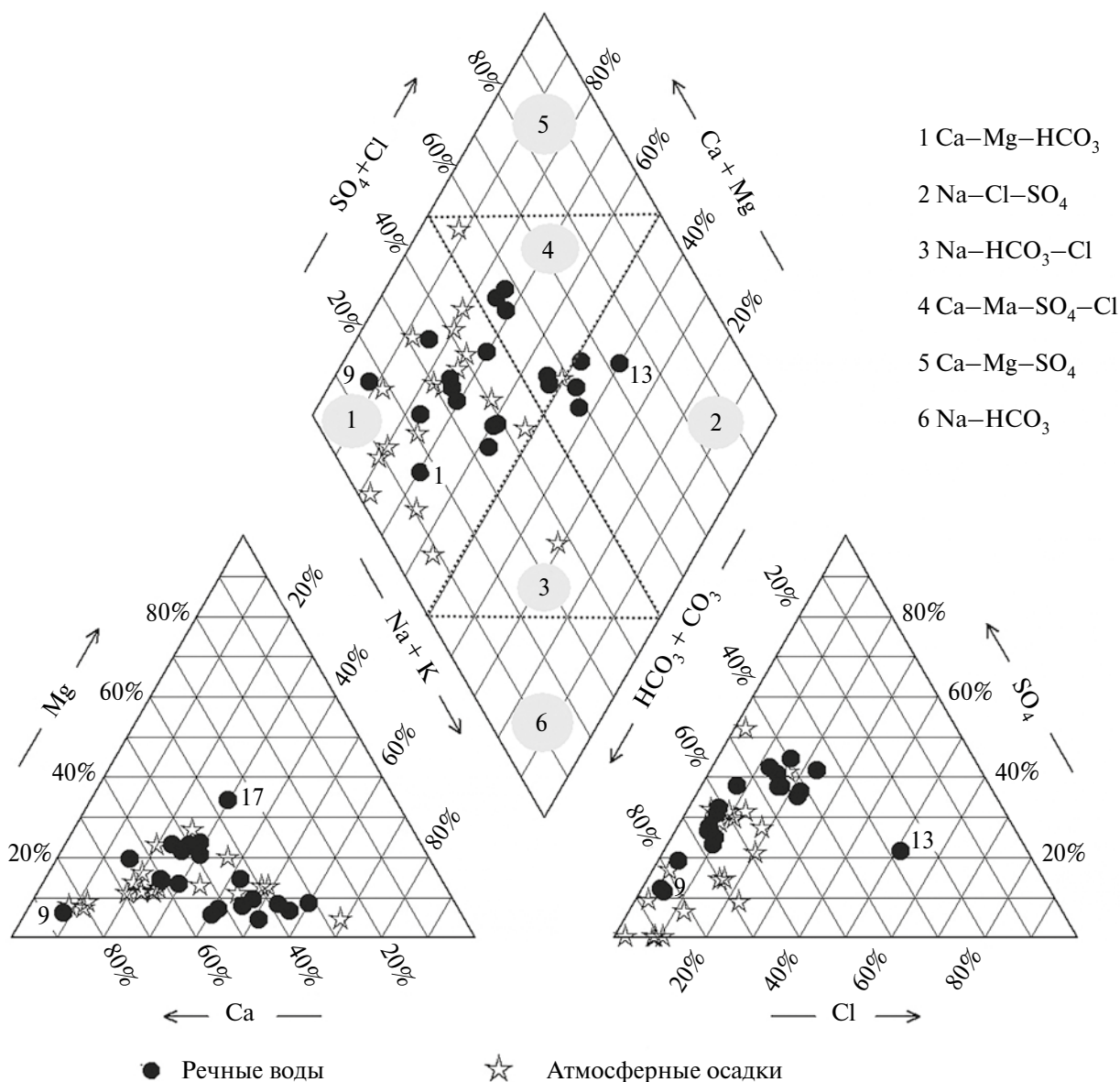


Рис. 5. Химические типы речных вод северо-западного склона Крымских гор на диаграмме Пайпера.

Опробования в верховьях р. Булганак не проводились, авторы располагают лишь данными по двум образцам, отобранном близ сел Кольчугино и Трудлюбово. По данным химического анализа вода солоноватая гидрокарбонатно-сульфатная кальциево-натриевая (табл. 2). При этом известно, что небольшие источники, формирующие сток р. Булганак, генетически связаны с нуммулитовыми известняками эоцена (рис. 2). В таком случае ожидаемый химический состав вод в верховьях — сульфатно-гидрокарбонатный, гидрокарбонатно-хлоридный магниевый-кальциевый [20].

Большое значение для водного баланса рек северо-западного склона Крымских гор имеет разгрузка грунтовых вод водоносного горизонта в аллювиальных, аллювиально-пролювиальных четвертичных отложениях (а, арQ). Водоносный горизонт приурочен к пойменным и надпойменным террасам и распространен узкими полосами в долинах рек Бельбек, Качи, Альмы, Булганак, Бодрак. Водовмещающие породы представлены гравийно-галечными и песчанистыми отложениями с прослоями суглинков и глин.

В верховьях рек воды аллювиального водоносного горизонта — гидрокарбонатные и сульфатно-гидрокарбонатные кальциевые с минерализацией 0.4–0.7 г/л. При пересечении долинами рек мергелей и глин Предгорных гряд в составе вод водоносного горизонта начинают преобладать сульфаты. В среднем и нижнем течении рек Бельбек и Качи минерализация составляет 0.8–1.1 г/л, в бассейне р. Альмы — 1.5–2.3 г/л, р. Булганак — 2.0–4.5 г/л. Питание водоносного горизонта (а, арQ) происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков и подпитки из нижележащих водоносных горизонтов и комплексов [20].

К сожалению, авторы статьи располагают только данными по составу макрокомпонентов в речных водах Северо-западного склона, что не позволяет выполнить полноценную экологическую оценку. Из публикаций [5, 18] известно, что реки Альма, Кача, Бельбек в нижнем течении существенно загрязнены.

Для того чтобы показать естественный химический состав незагрязненных вод региона, используем материалы по составу природных вод бассейна р. Бодрак (левый приток Альмы). Во-первых, бассейн р. Бодрак хорошо изучен в геологическом отношении. Во-вторых, для поверхностных, подземных и дождевых вод бассейна р. Бодрак имеется хороший гидрохимический материал.

РЕКА БОДРАК

Исток и верхние притоки р. Бодрак формируются на юго-западных склонах хребта Азапсырт (560 м н. у. м.) и северных склонах г. Вольской (486 м н. у. м.) в Южном эрозионно-денудационном межгрядовом понижении в области развития водоупорных флишевых отложений таврической серии.

Заложение долины р. Бодрак происходило преимущественно по зонам трещиноватости и тектонических нарушений. В среднем и нижнем течении р. Бодрак часть потока поглощается аллювиальными отложениями и трещиноватыми коренными породами. Подземные воды в аллювиальных отложениях и в подстилающих аллювий трещиноватых породах образуют еди-

ный подрусловой поток. Местами р. Бодрак течет по коренным породам. Хорошо выработанные формы говорят о размывающей силе водных потоков, которые и сформировали современное русло. В меженный период сток часто происходит подрусловым способом. Минимальные расходы (до пересыхания) наблюдаются в конце лета — осенью.

До створа д. Трудолюбовки водосборная площадь р. Бодрак составляет 44 км², на этой площади разгружаются трещинные воды 20–30 небольших источников, дебиты которых реагируют на количество атмосферных осадков и температуру приземного воздуха. Здесь развиты водоупорные флишевые отложения. Именно поэтому р. Бодрак в верхнем течении в летний период пересыхает в первую очередь. Наибольший объем в приходную часть водного баланса р. Бодрак дают левые притоки (после Тешинского моста) — Московский и Ленинградский овраги.

В Московском овраге есть месторождение пресных подземных вод, которое образовалось за счет подземных вод аллювиально-пролювиальных отложений Московского оврага (водосборная площадь 6.18 км²) и разгрузки мощного восходящего источника Вербочки. У выхода источника устроен водозабор, который обеспечивает питьевыми водами жителей д. Прохладное и студентов, приезжающих на летнюю практику (базы МГУ и МГРИ). Расход воды из водозабора Вербочки варьирует в зависимости от метеоусловий года и составляет в среднем 250–300 м³/сут. Вода — пресная жесткая гидрокарбонатная кальциевая.

Существование такого крупного источника обусловлено тектоническими условиями района — надвиговыми (шарьяжными) структурами в зоне Симферопольского меланжа; т. е. подземные воды источника Вербочки, вероятно, сформировались за пределами водосборного бассейна р. Бодрак и их генезис скорее всего связан с карстовыми водами верхнеюрских известняков Главной гряды.

Зачастую летний меженный сток р. Бодрак происходит исключительно за счет источника Вербочки. В отдельные жаркие периоды года,

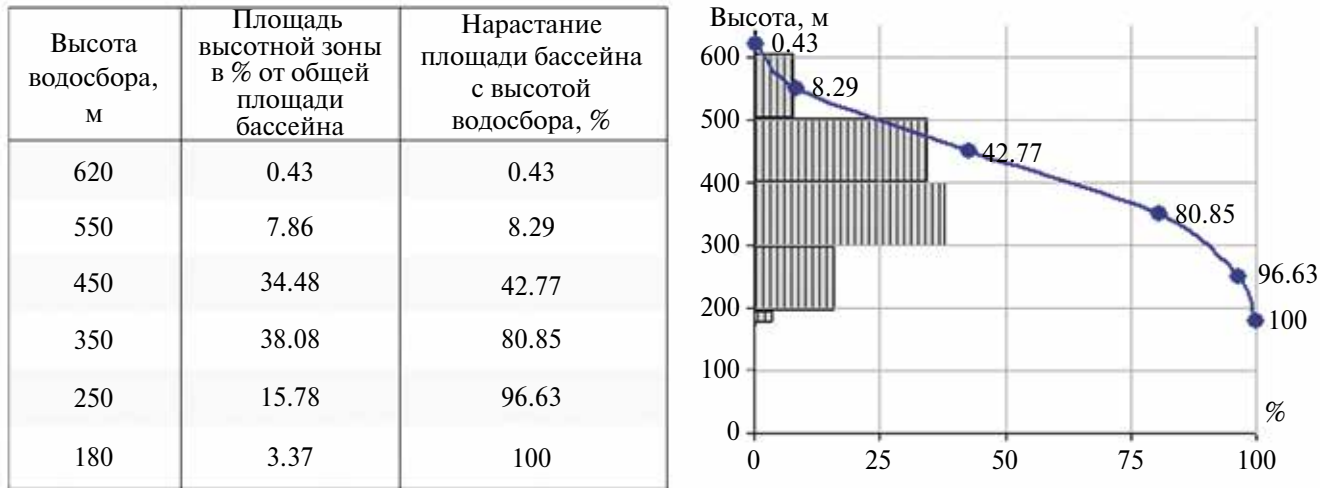


Рис. 6. Распределение площади водосбора р. Бодрак по высотным зонам.

когда мощность источника Вербочки существенно уменьшается, р. Бодрак полностью пересыхает.

Русло р. Бодрак на отдельных участках искусственно углублялось и спрямлялось, местами был сооружен противопаводковый вал.

Ближе к пос. Скалистому в зоне куэст долина р. Бодрак сужается, приобретая каньонообразный вид. Здесь происходит инфильтрационное и фильтрационное поглощение речных вод и временных потоков слабозакарстованными карбонатными отложениями. В областях рас-

пространения датских и среднеэоценовых нуммулитовых известняков имеется ряд небольших карстовых форм.

Длина р. Бодрак ~15.5 км, ширина летом ≤2 м. Площадь водосборного бассейна 76.5 км², средняя ширина водосбора 4.85 км (максимальная — 8.2 км). Густота речной сети бассейна р. Бодрак 0.5 км/км², коэффициент озерности 0.3. Средняя высота водосбора 380 м. Средняя отметка продольного профиля речного русла 250 м. Падение реки — 230 м (с уклоном 15‰). Перед впадением р. Бодрак в р. Альму ее продольный профиль несколько выполаживается, и в нижнем течении уклон р. Бодрак составляет 10‰. В недалеком геологическом прошлом (в начале четвертичного периода) р. Бодрак не была притоком р. Альмы, а текла к морю, Альма же протекала по долине нынешнего Западного Булганака [15].

О расположении площадей водосбора по высотным зонам можно судить по гипсометрической кривой (рис. 6). График строился по данным измерения площадей, лежащих между горизонталями (с использованием ArcGis в модуле ArcMap), и высотным отметкам. Гипсографическая кривая получена путем последовательного суммирования площадей, отложенных по оси абсцисс. На шкале процентов за 100% взята общая площадь бассейна.

На рис. 7 представлена водосборная площадь бассейна р. Бодрак, на которой указаны основ-

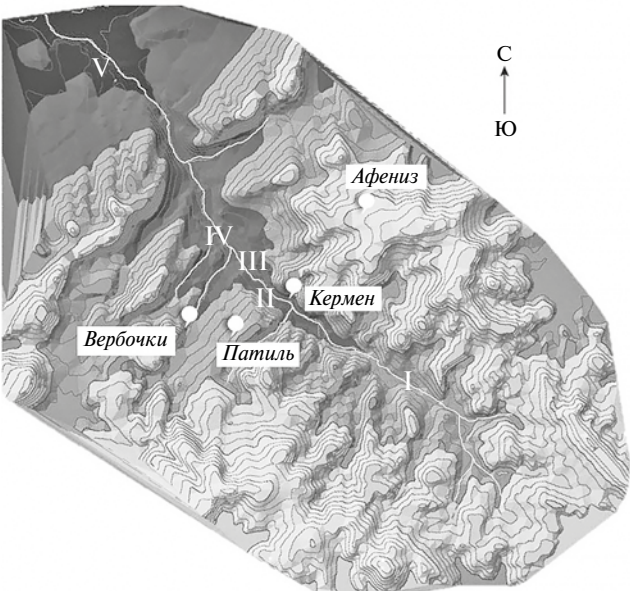


Рис. 7. Водосборный бассейн р. Бодрак.

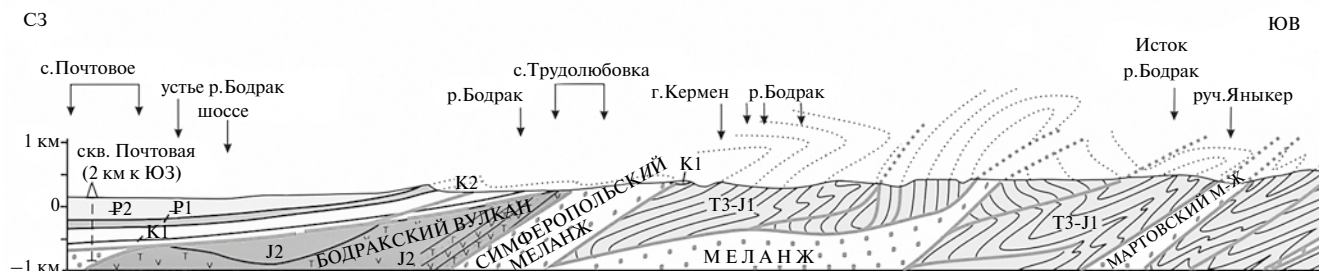


Рис. 8. Геологический разрез бассейна р. Бодрак [27].

ные источники (самый крупный — Вербочки). Римскими цифрами обозначены зоны, чтобы проследить смену химического состава речной воды по падению русла реки. На рис. 8 приведен геологический разрез бассейна р. Бодрак [27], по которому можно проследить, как сменяются геологические подразделения по течению реки.

Гидрохимический режим р. Бодрак

Среди природных факторов, влияющих на формирование химического состава вод р. Бодрак, большое значение имеет объем речного стока, увеличение которого приводит к уменьшению минерализации воды.

Поскольку сток р. Бодрак зависит от количества атмосферных осадков, рассмотрим первоначально их состав. Формула Курлова для дождевых вод (по данным [12]) выглядит так:

$$\frac{M(0.02-0.07) + HCO_3(42-97) + SO_4(0-52) + Cl(3-23)}{Ca(38-83) + Na(5-31) + Mg(7-27) + Na(14-18) + K(2-29)} \\ pH(6.0-8.3).$$

Атмосферные осадки отбирали в летний период (июнь—июль) в центре д. Трудолюбовки (координаты сбора осадков — 44°47'11.3" с.ш.; 33°59'50.34" в.д.).

В работе [8] подробно описаны особенности химического состава атмосферных осадков. Интересно, что в дождевых водах концентрации ряда элементов (Pb, Ni, Cu, Zn и др.) даже выше, чем в речных водах. Объясняется это тем, что летом воздух нередко насыщен пылеватыми частицами, а опробования при данном исследовании проводились исключительно в летние месяцы, когда дожди непродолжительны.

Несмотря на то, что протяженность русла р. Бодрак небольшая (~16 км), воды пресные и смена их объема в речном стоке Бодрак довольно активная; тем не менее вдоль речного русла обнаруживаются небольшие различия как в макрокомпонентном, так и в микрокомпонентном составе (табл. 3, 4). Это связано с тем, что р. Бодрак протекает с юго-востока на северо-запад вкост простирания горных пород различных стратиграфических подразделений. Подземные воды различных водоносных зон и горизонтов на изучаемой территории имеют специфические черты [9, 11]. Участие этих вод в ионном стоке р. Бодрак проявляется в той или иной степени в различии химического состава по руслу р. Бодрак (табл. 3, 4).

Исток и верхние притоки р. Бодрак формируются между Внутренней и Главной грядками Крымских гор на территории с характерным сопочным рельефом, сложенным флишевыми отложениями (Т₃-J₂ tv). В речных водах в верхнем течении наблюдается преобладание магния в катионном составе и повышенные концентрации сульфатов (по сравнению с участками в нижнем течении реки), минерализации имеют близкие значения:

$$\frac{M(0.5-0.6) + HCO_3(57-62) + SO_4(27-34) + Cl(9-12)}{Mg(40-41) + Ca(37-40) + Na(18-21) + K(1)} \\ pH(7.2-7.5).$$

Похожая картина отмечается и в химическом составе поверхностных вод ставков — открытых водоемов бассейна р. Бодрак [14].

В летние месяцы воды р. Бодрак в среднем течении имеют устойчивый сульфатно-гидрокарбонатный магниевый-кальциевый состав. Фор-

Таблица 3. Химический состав воды р. Бодрак и крупного источника Вербочки в 2003–2022 гг. (н.о. – не определялось; в круглых скобках – количество опробований; н.н. – не нормируется; полужирный шрифт – превышения норм СанПиН 1.2.3685-21)

Зоны на рис. 6	Место отбора пробы	Alt, м	pH, ед.	NO ₃ ⁻ , мг/л	Na ⁺ , мг/л %экв.	K ⁺ , мг/л %экв.	Ca ²⁺ , мг/л %экв.	Mg ²⁺ , мг/л %экв.	Cl ⁻ , мг/л %экв.	SO ₄ ²⁻ , мг/л %экв.	HCO ₃ ⁻ , мг/л %экв.	Ж, мг-экв/л	Мин-я, г/л	УЭП, мСм/см
I	Верховья Бодрак	370	7.2 (1)	3.5 (1)	44.0 (1) 21	3.9 (1) 1	66.0 (1) 37	44.0 (1) 41	36.9 (1) 12	115.0 (1) 27	336.0 (1) 61	6.9 (1)	0.6 (1)	н.о.
I	Бодрак у шлагабаума	350	н.о.	н.о.	28.6 (1) 18	2.9 (1) 1	55 (1) 40	33.9 (1) 41	23.4 (1) 9	120.0 (1) 34	256.2 (1) 57	5.5 (1)	0.5 (1)	0.88 (1)
II	Бодрак у горы Кермен	278	7.6 (14)	7.0 (9)	28.0 (16) 17	5.2 (15) 2	68.2 (22) 48	28.3 (22) 33	19.0 (24) 8	113.4 (11) 33	252.3 (24) 59	5.7 (22)	0.5 (24)	0.63 (19)
III	Бодрак у Тешиного моста	250	7.5 (8)	7.0 (3)	34.9 (10) 19	4.5 (6) 1	80.2 (9) 51	27.5 (9) 29	33.6 (8) 12	106.9 (8) 27	299.8 (9) 61	6.3 (9)	0.6 (9)	0.66 (7)
IV	Источник Вербочки	288	7.0 (5)	13.5 (3)	16.1 (5) 11	1.6 (4) 1	100.6 (6) 81	5.7 (6) 7	16.4 (5) 7	20.7 (5) 7	346.8 (6) 86	5.5 (6)	0.5 (5)	0.65 (8)
V	Бодрак у водозабора	243	7.9 (22)	6.5 (3)	33.4 (20) 21	2.5 (4) 1	66.4 (26) 48	25.2 (26) 30	23.4 (25) 9	93.0 (20) 28	271.5 (26) 63	5.4 (26)	0.5 (21)	0.60 (23)
	Бодрак у Альмы	165	7.9 (2)	54.2 (1)	23.9 (2) 13	4.5 (1) 2	101 (2) 65	19.3 (2) 20	30.2 (2) 11	71.2 (2) 18	351.4 (2) 71	6.6 (2)	0.6 (2)	0.78 (2)
Нормы СанПиН 1.2.3685-21 [24]														
Нормы рыбохозяйственные [22]														
			6–9 н.н.	45 40	200 120	н.н. 50	н.н. 180	50 40	350 300	н.н. 100	н.н.	7 н.н.	1 н.н.	н.н.

Таблица 4. Микрокомпоненты в составе воды р. Бодрак и крупного источника Вербочки в 2003–2010 гг. (полужирный шрифт – превышения норм СанПиН 1.2.3685-21)

Зоны, на рис. 6	Место отбора пробы	Количество проб	Al, мг/л	B, мг/л	Ba, мг/л	Cr, мг/л	Cu, мг/л	Fe, мг/л	Li, мг/л	Mn, мг/л	Ni, мг/л	Pb, мг/л	Si, мг/л	Sn, мг/л	Sr, мг/л	V, мг/л	Zn, мг/л
I	Верховья Бодрак	1	0.25	0.08	0.02	0.001	0.002	0.41	н.о.	0.019	0.002	0.0015	5.1	0.0025	0.30	0.0005	0.031
I	Бодрак у шлагабаума	1	0.20	0.14	0.35	0.002	0.004	0.27	0.005	0.015	0.003	0.0007	4.1	0.0005	0.38	0.0005	0.011
II	Бодрак у горы Кермен	8	0.13	0.11	0.15	0.002	0.003	0.22	0.005	0.010	0.001	0.0007	3.6	0.0032	0.43	0.0006	0.013
III	Бодрак у Тешиного моста	3	0.13	0.11	0.15	0.002	0.003	0.22	0.005	0.010	0.001	0.0007	3.6	0.0032	0.43	0.0006	0.013
	Источник Вербочки	4	0.09	0.05	0.71	0.001	0.003	0.09	0.006	0.003	0.001	0.0019	5.3	0.0012	0.99	0.0007	0.015
IV	Бодрак у водозабора	3	0.26	0.64	0.25	0.006	0.005	0.57	0.007	0.045	0.002	0.0026	4.0	0.0014	0.78	0.0013	0.018
V	Бодрак в нижнем течении	2	0.45	2.18	0.26	0.002	0.003	0.25	0.007	0.010	0.004	0.0010	5.1	0.0005	1.04	0.0015	0.013
Нормы СанПиН 1.2.3685-21 [24]			0.2 0.04	0.5 0.1	0.7 0.74	0.05 0.02(7)	1.0 0.001	0.3 0.1	0.03 0.08	0.1 0.01	0.02 0.01	0.01 0.006	20.0 н.н.	2.0 0.112	7.0 0.4	0.1 0.001	5.0 0.01
Нормы рыбохозяйственные [22]																	

мула Курлова для воды р. Бодрак у водозабора д. Трудюлюбовки имеет следующий вид:

$$M0.5 \frac{HCO_3(71-73)SO_4(18-19)Cl(9-10)}{Ca(65-67)Mg(18-19)Na(13-14)K(1)} \\ pH(7.2-8.4).$$

В отдельных водных пробах (в бездождевые годы), отобранных из р. Бодрак у водозабора д. Трудюлюбовки, в катионном составе на первое место выходил Mg. Это объясняется тем, что, вероятно, в эти годы его доля за счет подземного стока увеличивалась.

В нижнем течении перед впадением р. Бодрак в р. Альму химический состав воды р. Бодрак следующий:

$$M0.6 \frac{HCO_3 71 SO_4 18 Cl 11}{Ca 65 Mg 20 Na 13 K 1} pH 7.9.$$

Воду р. Бодрак зачастую используют в питьевых целях [7, 13]. Это случается в летний период, когда воды для хозяйственно-питьевых нужд не хватает. В табл. 3 и 4 представлены ПДК питьевой воды согласно СанПиН 1.2.3685-21 [24]. Для сравнения также приведены рыбохозяйственные нормативы ПДК вредных веществ [22]. Водным законодательством Российской Федерации установлен запрет на сброс в поверхностные водные

объекты сточных вод без очистки, однако это не всегда соблюдается. Так, данные из табл. 3 и 4 показывают, что в нижнем течении воды р. Бодрак загрязнены. В первую очередь это нитраты, а также ряд микроэлементов (Al, Fe, B). При этом можно видеть, что естественный повышенный фон Fe и Al наблюдается в верховьях р. Бодрак.

В табл. 5 демонстрируются основные статистические показатели химического состава воды р. Бодрак за длительный период наблюдения (2003–2022 гг.), которые свидетельствуют о том, что из всех показателей химического состава воды р. Бодрак лишь pH, УЭП и HCO_3^- относятся к однородной совокупности. Это объясняется в первую очередь климатическими колебаниями, а именно — количеством выпавших атмосферных осадков в каждый конкретный год и температурой приземного воздуха. В летнюю межень воды р. Бодрак трансформируются (концентрируются) под действием испарения, что подтверждается изотопным составом речных вод [9].

Таким образом, вариация концентраций практически всех химических элементов в воде р. Бодрак велика и представленные в табл. 5 средние значения трудно считать типичными. Тем не менее по данным табл. 5 можно судить о максимальных и минимальных значениях.

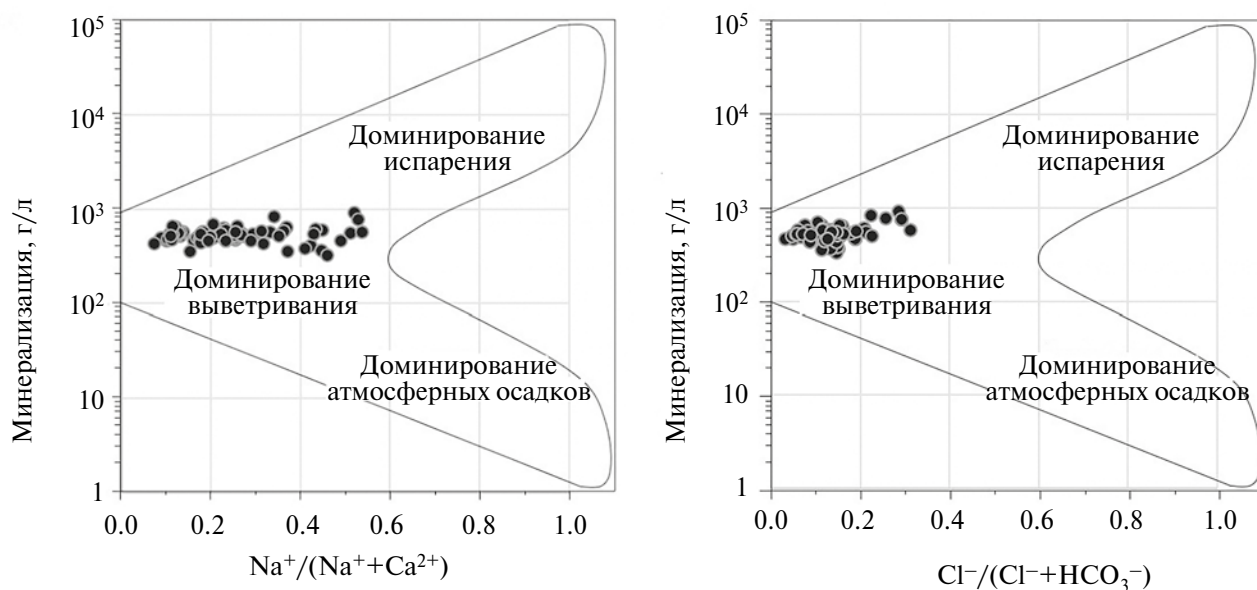


Рис. 9. Основные механизмы формирования химического состава р. Бодрак на диаграммах Гиббса [28].

Таблица 5. Описательная статистика химического состава воды р. Бодрак в 2003–2022 гг.

Статистические показатели	pH, ед.	Na, мг/л	K, мг/л	Ca, мг/л	Mg, мг/л	Cl, мг/л	SO ₄ ²⁻ , мг/л	HCO ₃ ⁻ , мг/л	УЭП, мСм/см	Ж, мг-экв/л	NO ₃ ⁻ , мг/л	Ba, мг/л	B, мг/л	Fe, мг/л	Zn, мг/л	Sr, мг/л	Li, мг/л	Si, мг/л	Al, мг/л	As, мг/л	Cu, мг/л
Количество данных	57	65	40	78	78	80	65	80	73	92	23	28	27	28	28	28	25	28	28	27	28
Среднее	7.7	30.5	4.2	68.6	29.0	24.8	105.7	274.0	0.64	6.0	11.1	0.37	0.31	0.25	0.028	0.54	0.006	4.8	0.213	0.0008	0.013
Минимум	6.8	4.4	1.3	4.8	0.0	0.7	26.4	5.6	0.38	2.4	3.5	0.02	0.08	0.09	0.001	0.30	0.004	1.98	0.002	0.0002	0.001
Максимум	8.8	67.4	7.6	132.0	97.3	75.6	307.2	414.8	1.08	9.2	54.2	1.30	4.27	0.89	0.130	1.23	0.009	15.0	0.77	0.0025	0.23
Медиана	7.8	28.6	4.0	71.7	26.7	23.4	100.0	268.4	0.65	5.8	6.7	0.36	0.12	0.20	0.019	0.45	0.007	4.19	0.2	0.0006	0.005
Коэффициент вариации	6.9	37.8	41.2	35.5	59.1	50.4	42.7	22.7	16.2	40.4	101.5	70.2	261.4	65.2	109.3	39.0	25.9	54.3	64.2	73.7	337.4

Статистические показатели	Cd, мг/л	Co, мг/л	Cr, мг/л	Mn, мг/л	Mo, мг/л	Ni, мг/л	P, мг/л	Rb, мг/л	Sb, мг/л	Se, мг/л	Sn, мг/л	Th, мг/л	Ti, мг/л	Tl, мг/л	U, мг/л	V, мг/л
Количество данных	28	28	28	28	28	28	28	22	28	27	28	22	28	28	22	28
Среднее	0.0002	0.0002	0.0029	0.0130	0.0004	0.0020	0.0014	0.0009	0.0004	0.0007	0.0016	0.0001	0.0049	0.0002	0.0009	0.0008
Минимум	0.0000	0.0001	0.0005	0.0001	0.0001	0.0005	0.0000	0.0002	0.0001	0.0005	0.0000	0.0001	0.0005	0.0001	0.0002	0.0003
Максимум	0.0050	0.0006	0.0128	0.0690	0.0009	0.0050	0.0055	0.0013	0.0025	0.0025	0.0044	0.0006	0.0361	0.0025	0.0018	0.0023
Медиана	0.0000	0.0002	0.0020	0.0089	0.0004	0.0018	0.0009	0.0011	0.0002	0.0005	0.0010	0.0001	0.0029	0.0001	0.0009	0.0006
Коэффициент вариации	424.5	52.3	87.1	123.1	38.5	45.4	92.6	36.5	160.3	86.5	79.7	140.9	143.9	267.0	36.8	57.8

Для выяснения основных природных механизмов, обуславливающих формирование химического состава воды р. Бодрак (точнее – преобладающего источника растворенных солей в речных водах), построены диаграммы Гиббса (рис. 9).

Предложенные Р. Гиббсом диаграммы процессов показывают доминирование трех основных естественных механизмов, контролирующих химический состав поверхностных вод: атмосферные осадки, выветривание горных пород и испарение [28]. В исследуемом случае вклад процессов выветривания в формирование химического состава речных вод преобладает.

В процессе химического выветривания – взаимодействия воды и породообразующих минералов – в составе речных вод создается определенная комбинация основных ионов.

Термодинамическое моделирование использовано и для оценки степени насыщения природных

вод бассейна р. Бодрак основными породообразующими минералами (карбонатами и алюмосиликатами). Для оценки степени неравновесности вод по отношению к минералам применяют индекс насыщения SI (“saturation index”), который показывает вероятность осаждения твердой фазы из раствора. Раствор перенасыщен, если $SI > 0$, и недонасыщен, если $SI < 0$. При $SI = 0$ водный раствор находится в равновесии с минералом. SI вычисляют как десятичный логарифм отношения произведения активностей ионов P_a к константе растворимости K соединения или минерала при заданной температуре: $SI = \log P_a/K$.

В табл. 6 представлены данные о степени насыщения речных вод некоторыми карбонатными и алюмосиликатными минералами на разных участках р. Бодрак. Для сравнения приведены расчеты для атмосферных осадков и некоторых источников.

Для рассмотрения выбраны минералы, характеризующие горные породы бассейна р. Бодрак:

Таблица 6. Степень насыщения природных вод бассейна р. Бодрак по отношению к некоторым минералам (КПШ – калиевый полевой шпат)

Зоны на рис. 6	Водные объекты	Степень насыщения		
		Недонасыщенные $SI < -0.2$	Равновесные $-0.2 < 0 < 0.2$	Пересыщенные $SI > 0.2$
	Атмосферные осадки	Са-монтмориллонит, барит, иллит, сидерит, кальцит, арагонит, гипс, КПШ, ангидрит, доломит		К-слюда, каолинит, гиббсит
I	р. Бодрак в верхнем течении	Кальцит, арагонит, сидерит, доломит, гипс, ангидрит	КПШ	К-слюда, каолинит, Са-монтмориллонит, иллит, гиббсит, барит,
II	р. Бодрак у горы Кермен	Кальцит, арагонит, сидерит, доломит, гипс, ангидрит		К-слюда, каолинит, Са-монтмориллонит, иллит, гиббсит, барит, КПШ
IV	р. Бодрак у водозабора	Арагонит, доломит, гипс, ангидрит	Кальцит, сидерит	К-слюда, каолинит, Са-монтмориллонит, иллит, гиббсит, барит, КПШ
V	р. Бодрак в нижнем течении	Арагонит, доломит, сидерит, гипс, ангидрит	Кальцит	К-слюда, каолинит, Са-монтмориллонит, иллит, гиббсит, барит, КПШ
	Родник Кермен	Арагонит, КПШ, доломит, сидерит, гипс, ангидрит	Кальцит	К-слюда, каолинит, Са-монтмориллонит, иллит, гиббсит, барит
	Родник Патиль	Арагонит, доломит, КПШ, сидерит, гипс, ангидрит	Кальцит	К-слюда, каолинит, Са-монтмориллонит, иллит, гиббсит, барит
	Родник Афениз	Доломит, сидерит, гипс, ангидрит	Кальцит, арагонит, КПШ	К-слюда, каолинит, Са-монтмориллонит, иллит, гиббсит, барит

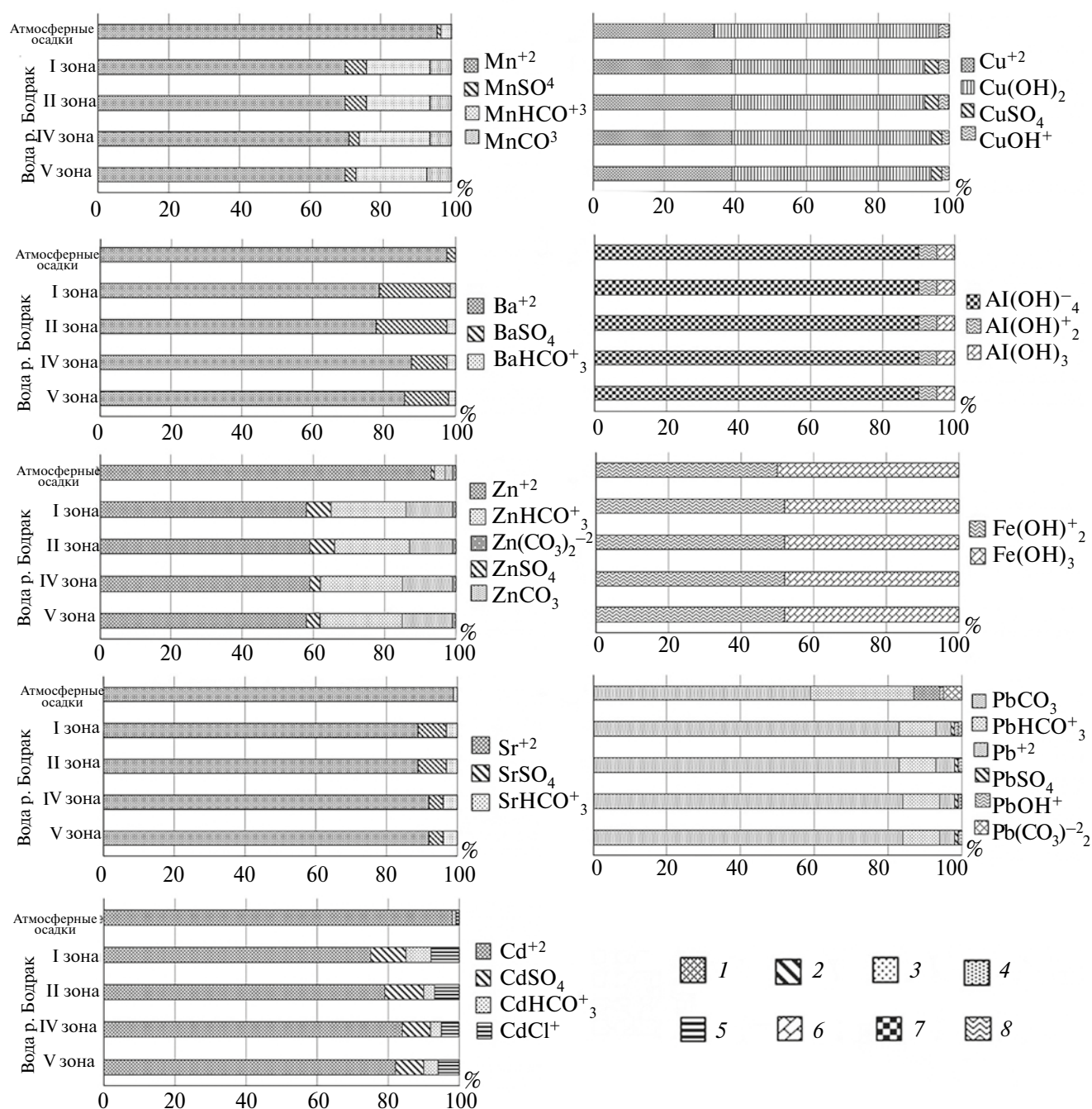


Рис. 10. Результаты термодинамических расчетов распределения основных форм тяжелых металлов в водах р. Бодрак и атмосферных осадках (зоны показаны на рис. 7). Растворенные формы металлов: 1 — свободные ионы; 2 — сульфатные комплексы; 3 — гидрокарбонатные комплексы; 4 — карбонатные комплексы; 5 — хлоридные комплексы; 6 — нейтральные гидроксидные комплексы; 7 — аниогенные гидроксидные комплексы; 8 — катиогенные гидроксидные комплексы.

карбонатные (кальцит, доломит, арагонит, сидерит), сульфатные (гипс, ангидрит, барит), некоторые алюмосиликаты (полевошпат, монтмориллонит, каолинит, иллит, гиббсит, слюда).

Положительные SI (слюды, каолинит, гиббсит) для атмосферных осадков работают в пользу наличия в воздухе пылеватых частиц. Воды в верховьях р. Бодрак недонасыщены по кальциту и пересыщены некоторыми алюмосиликатами.

Ниже впадения в р. Бодрак ручья Московского оврага (сток которого обеспечивают подземные воды источника Вербочки) воды р. Бодрак становятся равновесны с кальцитом. В среднем и нижнем течении р. Бодрак (области III, IV, V на рис. 6) сток происходит главным образом за счет подземных вод, генетически связанных с карбонатными породами.

Для вод р. Бодрак рассчитаны (на основе программы PHREEQC Interactive 2.15.0) наиболее вероятные миграционные формы химических элементов без учета органических форм, поскольку органические вещества не изучались.

Основные катионы — калий и натрий — в 100% случаев мигрируют в виде свободных катионов (K^+ , Na^+). Кальций и магний мигрируют в виде Ca^{2+} и Mg^{2+} в 88–92% случаев, ~10% связываются в катионные гидрокарбонатные комплексы $CaHCO_3^+$ и $MgHCO_3^+$. Карбонатные и гидрокарбонатные ионы вносят наибольший вклад в комплексообразование. Железо мигрирует в 52% случаев в виде катионных гидроксидных комплексов $Fe(OH)^{2+}$ и нейтральных гидроксидных комплексов $Fe(OH)_3$. Доминирующая (90%) форма миграции для алюминия — $Al(OH)_4^-$.

Формы миграции химических элементов в подземных и поверхностных водах зависят как от внутренних факторов (радиус ионов, валентность, энергетические свойства и др.), так и от внешних (рН и Eh среды, температура, давление, концентрация растворенного вещества). Изучение форм миграции элементов имеет большое значение при оценке качества воды, а также помогает понимать механизмы и процессы формирования химического состава природных вод. Так, разные формы миграции одного и того же

элемента имеют разную токсичность, а значит — разное воздействие на живые организмы (в том числе и человека). Наибольшую токсичность проявляют свободные (гидратированные) ионы металлов и их гидроксокомплексы [16, 17].

Полученные в результате термодинамических расчетов данные о формах нахождения тяжелых металлов в водах р. Бодрак и атмосферных осадков (без учета соединений с органическими радикалами) свидетельствуют о преобладании свободных незакомплексованных форм и их гидроксокомплексов. Таким образом, в водах р. Бодрак преобладают именно токсичные формы тяжелых металлов, однако общие концентрации металлов часто не превышают санитарные нормы (табл. 4).

Вариации миграционных форм тяжелых металлов в водах р. Бодрак по руслу реки незначительны (рис. 10). Тем не менее заметно, что в верхнем течении р. Бодрак процентное содержание сульфатных комплексов выше, чем в нижнем течении. Рыбохозяйственные санитарные нормы [22] существенно строже современных норм СанПиН [24]: воды р. Бодрак по ряду микрокомпонентов (Al, Cu, Fe, Mn, Sr, Zn) не соответствуют современным рыбохозяйственным стандартам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реки северо-западного склона Крымских гор относятся к категории малых. Речные воды, как правило, пресные, за исключением приустьевых участков, где происходит фильтрация морских вод или есть антропогенное загрязнение. Преобладающий тип вод (не затронутый антропогенным воздействием) — гидрокарбонатный магниево-кальциевый. К доминирующим механизмам, контролирующим формирование химического состава речных вод, относится выветривание горных пород.

В верховьях р. Бодрак химический состав вод формируется в основном за счет выветривания алюмосиликатов. В среднем и нижнем течении реки доминирующие процессы формирования химического состава — растворение и выщелачивание карбонатных пород.

Минерализация рек меняется в широких пределах, увеличиваясь по направлению с юго-востока на северо-запад. Для летнего периода минерализация меняется от 0,3 г/л в верховьях рек до 1 г/л в нижнем течении. Наименьшая минерализация речных вод связана с зимними и весенними осадками.

Исследования, проводимые в бассейне р. Бодрак, свидетельствуют о том, что концентрации растворенных форм металлов имеют некоторые вариации на отдельных участках речного русла, обусловленные изменением геолого-гидрогеологических условий и антропогенным воздействием населенных пунктов.

В летние месяцы воды р. Бодрак в среднем течении имеют устойчивый сульфатно-гидрокарбонатный магниевый-кальциевый состав. В верховьях реки (на территории развития флишевых отложений) наблюдается преобладание магния в катионном составе речных вод и повышенные концентрации сульфатов (по сравнению с участками в нижнем течении реки). За период наблюдения тип вод не изменился.

Повышенные концентрации некоторых элементов (Al, Fe) в речных водах обусловлены как естественными причинами (такими как литологический состав пород), так и воздействием сельскохозяйственных и коммунально-бытовых стоков.

Выявлены некоторые изменения средних содержаний микроэлементов по продольному профилю р. Бодрак, главным образом в нижнем течении реки (перед впадением р. Бодрак в р. Альму).

Хорошее качество речных вод обеспечивается источником Вербочки (имеющим гидрокарбонатно-кальциевый состав) и родниковым стоком Ленинградского оврага. Воды р. Бодрак используются для питья, хозяйственных целей, орошения, водопоя скота.

Естественный химический состав воды р. Бодрак может быть использован в качестве индикатора экологического состояния поверхностных вод региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автономная республика Крым. Атлас / Под ред. *Н.В. Багрова, Л.Г. Руденко*. Киев; Симферополь: Ин-т географии НАН Украины, 2003. 80 с.
2. *Альбов С.В.* Гидрогеология Крыма. Киев: Изд-во АН УССР, 1956. 321 с.
3. *Блага Н.Н.* Геоморфологический анализ долины Западного Булганака в пределах Внутренней гряды Крымских гор // Уч. записки Крымского федерального ун-та. География. Геология. 2022. Т. 8. № 2. С. 134–145.
4. Гидрогеология СССР. Т. 8. Крым / Под ред. *В.Г. Ткачук*. М.: Недра, 1970. 365 с.
5. *Иванютин Н.М.* Изучение влияния антропогенной деятельности на экологическое состояние реки Альма // Современное состояние, проблемы и перспективы развития аграрной наук: Материалы III Междунар. конф. Ялта: Ариал, 2018. С. 252–253.
6. Карта подземных вод L-36, L-37. Государственная геологическая карта СССР (Симферополь). Карта подземных вод (1983). Масштаб: 1 : 000 000 / Под ред. *И.Н. Павловец*. СПб.: ВСЕГЕИ, 1986.
7. *Каюкова Е.П.* Водные ресурсы и проблемы водопользования в восточной части Бахчисарайского района // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность — 2017: Материалы конф. 11–15 сентября 2017 г. Севастополь: Севастопольский гос. ун-т, 2017. С. 605–609.
8. *Каюкова Е.П.* Гидрохимические особенности атмосферных осадков полигона Крымской геологической практики СПбГУ // Вестн. СПбГУ. Сер. 7. Геология, география. 2011. Вып. 2. С. 26–43.
9. *Каюкова Е.П.* Химический и изотопный состав природных вод бассейна реки Бодрак (Юго-Западный Крым. Материалы V Всерос. конф. “Полевые практики в системе высшего образования” / Под ред. *В.В. Аркадьева*. СПб.: ВВМ, 2017. С. 153–156.
10. *Каюкова Е.П., Аркадьев В.В.* Крымская учебная практика по геологическому картированию студентов Санкт-Петербургского государственного университета / Под ред. *В.В. Аркадьева* // Геология Крыма: Ученые записки кафедры осадочной геологии СПбГУ. Вып. 3. СПб.: ЛЕМА, 2021. С. 23–42.
11. *Каюкова Е.П., Барабошкина Т.А., Филимонова Е.А.* Гидрогеохимические особенности подземных вод бассейна р. Бодрак (Качинское поднятие Горного Крыма) // Вестн. МГУ. Сер. 4, Геология. 2020. № 4. С. 55–63.

12. Каюкова Е.П., Котова И.К. Экологическая оценка химического состава дождевых осадков в пределах Внутренней гряды Крымских гор // Вестн. СПбГУ. Сер. 7. Геология, география. 2012. Вып. 1. С. 39–49.
13. Каюкова Е.П., Филимонова Е.А. Качество пресных подземных вод Горного Крыма (долина р. Бодрак) // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 2022. № 1. С. 79–88.
14. Каюкова Е.П., Харитоновна Н.А., Филимонова Е.А., Чарыкова М.В. Формирование химического и изотопного составов поверхностных вод открытых водоемов бассейна реки Бодрак (северо-западный склон Крымских гор) // Вод. ресурсы. Т. 49. № 4. 2022. С. 492–505.
15. Лебединский В.И. Геологические экскурсии по Крыму. Симферополь: Таврия, 1988. 144 с.
16. Линник П.Н. Содержание лабильной фракции металлов в поверхностных водах как важный элемент при оценке их потенциальной токсичности // Гидробиол. журн. Т. 46. 2010. № 6. С. 90–104.
17. Линник П.Н., Набиванец Б.И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 269 с.
18. Миньковская Р.Я., Ингерев А.В. Гидрохимическая характеристика рек севавтопольского региона // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2010. № 22. С. 265–281.
19. Никитин М. Ю., Болотов С. Н. Геологическое строение Крымского учебного полигона МГУ. Ч. 2. Уч. пособие. М.: Изд-во МГУ, 2007. 110 с.
20. Объяснительная записка к Государственной геологической карте Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000. Третье поколение. Сер. Скифская. Л. L-36 (Симферополь) / Составители Л.А. Филюкина, С.В. Белецкий, О.А. Белокрыс и др. СПб.: ВСЕГЕИ, 2019. 979 с.
21. Погода и Климат. Справочно-информационный портал.: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения: 13.02.2024)
22. Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 (ред. от 10.03.2020) “Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения” (Зарегистрировано в Минюсте России 13.01.2017 № 45203).
23. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрогеологические характеристики. Т. 6. Украина и Молдавия / Под ред. М.М. Айзенберга, М.С. Каганера. Вып. 4. Крым. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 344 с.
24. Санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”.
25. Тагильцев С.Н., Сурганов С.В., Тагильцев В.С., Курченко А.А. Оценка ресурсов подземных вод в прибрежной части юго-западного Крыма // Современная гидрогеология: актуальные вопросы науки, практики и образования. Тр. Всерос. конф. Сочи. 2023. М.: МГУ, 2023. С. 117–123.
26. Хильчевський В.К., Осадчий В.І., Курило С.М. Регіональна гідрохімія України: підручник. Київ: ВПЦ “Київський університет”, 2019. 343 с.
27. Юдин В.В. Геологическое строение Крыма на основе актуалистической геодинамики. Симферополь, 2001. 46 с.
28. Gibbs R.J. Mechanisms controlling world water chemistry // Sci. 1970. № 170. P. 1088–1090.
29. Piper A.M. A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water-Analyses // Eos, Transactions Am. Geophys. Union. 1944. № 25. P. 914–928.

ABOUT THE FORMATION OF CHEMICAL COMPOSITION OF RIVER WATERS OF THE NORTH-WESTERN SLOPE OF THE CRIMEAN MOUNTAINS

E. P. Kayukova*

St. Petersburg State University, St Petersburg, 199034 Russia

**e-mail: epkayu@gmail.com*

The main factors in the formation of the chemical composition of river waters of the northwestern slope of the Crimean Mountains have been studied, and the ecological state of river waters has been assessed. The data for the presented work were obtained as a result of summer field work in 2003–2022. The chemical composition of rivers is not constant and varies depending on meteorological conditions of a particular year and anthropogenic impact. The influence of geological and hydrogeological conditions on the composition of macro- and microcomponents in natural waters of the region is shown. Concentrations of chemical elements in surface waters of the Bodrak River basin can be used as natural (background) contents of chemical elements.

Keywords: rivers of the north-western slope of the Crimean Mountains, surface water, chemical composition, Gibbs diagrams, saturation indices, migration forms

УДК [546.36.027*137+661.723]/(282.247.346)

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДДТ,
ЕГО МЕТАБОЛИТОВ И ЦЕЗИЯ-137 В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ
РЕКИ САЛГИР (КРЫМ)¹© 2024 г. Л. В. Малахова^{a, b, *}, Н. Ю. Мирзоева^b, И. Н. Мосейченко^{a, b}, В. В. Войцеховская^{a, b},
Т. В. Малахова^b, С. В. Овечко^a^a Научно-исследовательский центр пресноводной и солоноватоводной гидробиологии, Севастополь, 299011 Россия^b ФИЦ “Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН”, Севастополь, 299011 Россия

*e-mail: malakh2003@list.ru

Поступила в редакцию 05.03.2024 г.

После доработки 27.03.2024 г.

Принята к публикации 27.03.2024 г.

Исследованы пространственно-временные изменения содержания и распределения хлорорганического пестицида п,п'-дихлордифенилтрихлорэтана (ДДТ) и его метаболитов и цезия-137 в донных отложениях наиболее протяженной крымской р. Салгир. Пространственное распределение концентрации ΣДДТ и цезия-137 имело неравномерный очаговый характер. Максимальное содержание ΣДДТ, превышающее ориентировочно допустимые уровни в донных отложениях >10 раз, было выявлено в среднем течении реки в районах с. Красная Зорька и Пятихатка (270 и 256 нг/г сухой массы соответственно). В этих районах доля ДДТ в его суммарной концентрации с метаболитами составляла >40%. Соотношение метаболита ДДЭ и ДДТ указывает на “свежее” поступление исходного пестицида в экосистему реки. Активность ¹³⁷Cs в поверхностном слое донных отложений изменялась от 4.4 до 69 Бк/кг сухой массы. С использованием геохронологии распределения ¹³⁷Cs в кернах из среднего течения реки определена скорость осадконакопления, проведена датировка осадков и реконструкция поступления ΣДДТ в грунты реки с 1950-х гг. по настоящее время. Выявлен период максимальной загрязненности ДДТ донных отложений, соответствующий 1950–1960 гг. Обнаружение высоких уровней запрещенных пестицидов в поверхностных слоях донных отложений указывает на локальные источники их поступления в реку. Это требует принятия мер для их выявления и защиты речной экосистемы от загрязнения.

Ключевые слова: ДДТ и его метаболиты, цезий-137, донные отложения, река Салгир, Крым.

DOI: 10.31857/S0321059624060125 EDN: VOBSAV

ВВЕДЕНИЕ

П,п'-дихлордифенилтрихлорэтан (п,п'-ДДТ (ДДТ)) — один из самых распространенных и опасных хлорорганических пестицидов (ХОП), которые поступали в природную среду [41, 48, 49]. В СССР ДДТ производили и активно использовали с 1940-х гг. [16, 38]. В природных условиях ДДТ устойчив, но со временем может разлагаться на метаболиты дихлордифенил-

дихлорэтан (п,п'-ДДД (ДДД)) и ДДЕ дихлордифенилдихлорэтилен (п,п'-ДДЭ (ДДЭ)). ДДТ и метаболиты способны накапливаться в живых организмах с увеличением концентрации по трофической цепи. В 1970-х гг. было выявлено токсическое действие ДДТ на репродуктивную, нервную, иммунную и эндокринную системы многих живых организмов [8, 37, 47, 48] и был введен запрет на его использование [36]. Несмотря на это, в СССР применение ДДТ для борьбы с насекомыми продолжалось до конца 1980-х гг. Накопившаяся масса запрещенных пестицидов во многих районах хранилась на складах, которые постепенно разрушались [17]. При этом пестициды могли попадать в природную среду, что приводило к образованию множества очагов высокого загрязнения ДДТ в почве, донных отложениях, растительности, поверхностных и подземных водах [1, 3, 17, 23, 25, 27, 42, 45].

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ ПСГ “Изучение особенностей структуры и динамики пресноводных экосистем Северного Причерноморья” (государственная регистрация № 123101900019-5) и ФИЦ ИнБЮМ “Изучение биогеохимических закономерностей радиоэкологических и хемозоологических процессов в экосистемах водоемов Азово-Черноморского бассейна в сравнении с другими акваториями Мирового океана и отдельными водными экосистемами их водосборных бассейнов для обеспечения устойчивого развития на южных морях России” (государственная регистрация № 1023032000047-8-1.6.19).

Основными источниками поступления ^{137}Cs в водосборные бассейны рек Крыма были атмосферные осадки после аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. [15], а также вода р. Днепр, поступавшая до 2014 г. по Северо-Крымскому каналу (СКК) [13]. В 2006 г. удельная активность ^{137}Cs в почвах Центрально-Крымской равнины изменялась в пределах 2–4 Бк/м², что несколько превышало дочернобыльский уровень [2]. В период 2022–2023 гг. было установлено, что ^{137}Cs поступал на территорию Крыма со взвешенным веществом днепровской воды по СКК, при этом его активность в воде не превышала нормы радиационной безопасности, установленные Российской Федерации [32].

Выявление и контроль загрязнения речных систем опасными веществами имеет ключевое значение для обеспечения безопасности питьевой воды и в поддержании надлежащего качества в орошении сельскохозяйственных районов. В Крыму особое внимание уделяется р. Салгир, начинающейся на северных склонах Крымских гор, текущей через весь Крым и впадающей в зал. Сиваш Азовского моря [18].

Оценка состояния воды р. Салгир представлена в ежегодных отчетах государственных органов. В них воду р. Салгир квалифицировали как “грязную”, а в районе с. Двуречье, по анализу биохимического потребления кислорода, как “очень загрязненную” [21]. Информация о содержании ДДТ и его метаболитов в р. Салгир ограничена одной публикацией [26], где сообщается, что ХОП были обнаружены в четырех точках реки. В районе с. Молочное концентрация ДДТ в воде Салгира была >3 ПДК для рыбохозяйственных водоемов (10 нг/л). Проведенное исследование поставило задачу определить загрязнение ДДТ по всему руслу реки с целью выявления источников его поступления.

Благодаря своей высокой гидрофобности ДДТ может прочно связываться с твердыми частицами и удаляться в донные отложения, которые являются резервуаром многих загрязняющих веществ в водных системах. Однако при определенных условиях ХОП могут вновь поступить в экосистему и пищевую цепь, становясь потенциальным источником локального или даже гло-

бального загрязнения. Поэтому современные и ретроспективные данные о загрязнении донных отложений этими соединениями имеют большое значение для понимания текущего экологического состояния и истории загрязнения районов исследования [25, 43].

Для изучения хронологии загрязнения водоемов широкое распространение получило использование природных и техногенных радионуклидов в качестве трассеров для датировки осадков [12, 39]. Техногенный радионуклид ^{137}Cs , который поступил в окружающую среду после глобальных испытаний ядерного оружия в 1960-х гг., а также в результате радиоактивных выбросов во время аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г., — один из таких трассеров [40].

Цель данного исследования — оценка пространственно-временных изменений содержания ДДТ, его метаболитов и ^{137}Cs в донных отложениях наиболее протяженной крымской р. Салгир.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отбор проб донных отложений проводили с мая по октябрь 2023 г. в 13 точках р. Салгир: выше и ниже г. Симферополя в районах сел Доброго, Белоглинка и Совхозного, в среднем течении — от с. Красная зорька до с. Новогригорьевка и в нижнем течении — до с. Изобильного (рис. 1).

Глубина реки в районах отбора составляла от 0.3 до 0.6 м. Пробы поверхностного слоя (0–5 см) отбирали непосредственно в стеклянные емкости. В стационарной лаборатории грунты гомогенизировали и высушивали на воздухе до сухого состояния.

Для выполнения датировки осадков и реконструкции поступления $\Sigma\text{ДДТ}$ и ^{137}Cs на ст. 7 и ст. 13 трубчатым пробоотборником гравитационного типа были отобраны керны грунтов. Диаметр полученных кернов составлял 58 мм, высота в районе ст. 7 — 26 см, ст. 13 — 22 см. Колонки донных осадков разделяли с помощью поршневого экструдера на слои толщиной 1 см. Каждый слой после нарезки взвешивали в сыром виде и высушивали на воздухе до постоянной массы.



Рис. 1. Картохема станций отбора проб донных отложений в р. Салгир.

По разности сырой и сухой массы рассчитывали содержание естественной влажности (ЕВ) в процентах сырой массы и в каждом слое фотометрическим методом определяли содержание органического углерода (C_{org}) [9].

Концентрацию ДДТ, его метаболитов ДДД и ДДЭ определяли методом газовой хроматографии в соответствии с методикой [10]. Из навески сухой пробы (от 5 г в илах до 10 г в песках) проводили экстракцию смесью н-гексана (квалификации “особо чистый” (о.с.ч.), Криохром) и ацетона (о.с.ч., Lab-Scan) в соотношении 3 : 1. Экстракты очищали на колонках с флорисилом (Merk). Серу из экстрактов удаляли активированной металлической медью (квалификации “химически чистый”, Компонент-Реактив). Анализ ХОП был выполнен в ЦКП “Спектрометрия и хроматография” ФИЦ ИнБЮМ на газовом хроматографе Хроматэк Кристалл 5000.2 с микро-ДЭЗ и 30-метровой колонкой с фазой CR-5. Расчет концентрации проводили с использованием многоуровневой калибровки градуировочными смесями, приготовленными из сертифицированных стандартных образцов ХОП фирмы “Sigma-Aldrich”. Погрешность определения ХОП $\leq 15\%$. Концентрация ХОП выражена на сухую массу образцов.

Активность ^{137}Cs определяли в поверхностном слое донных осадков на ст. 4, 6, 12 и 13. Для проведения геохронологических оценок активность ^{137}Cs определяли послойно в кернах, отобранных на ст. 7 и 13. Измеряли содержание ^{137}Cs на

полупроводниковом детекторе на основе кристалла сверхчистого германия (НТЦ “РАДЭК”, Санкт-Петербург, РФ) на базе ЦКП “Спектрометрия и хроматография” ФИЦ ИнБЮМ. Калибровку детектора проводили с помощью эталонных образцов донных осадков, выпускаемых МАГАТЭ для международной стандартизации радиометрических измерений. Активность ^{137}Cs определяли по регистрации излучения гамма-квантов его дочернего радионуклида — ^{137m}Ba с энергией 661.6 кэВ. Активность радионуклида $A_{^{137}\text{-Cs}}$ рассчитывали по формуле: $A_{^{137}\text{-Cs}} = (N_{^{137}\text{-Cs}} - N_{\phi})/E$, где $N_{^{137}\text{-Cs}}$ — общая скорость счета радионуклида, имп/с; N_{ϕ} — скорость счета фона, имп/с; E — эффективность регистрации излучения радионуклида. Содержание ^{137}Cs рассчитано на сухой вес осадка, а статистическая погрешность рассчитана по величине одного стандартного отклонения от средних значений [34].

Средняя скорость осадконакопления (см/год), рассчитанная по ^{137}Cs , использована для определения возраста слоев донных отложений по формуле [11]: $T = T_0 - h/S$, где T — абсолютный возраст слоя, годы; T_0 — год отбора пробы; h — средняя глубина слоя, см; S — скорость осадконакопления, см/год.

Статистическая обработка данных (средние значения, построение матрицы коэффициентов корреляции) и графическое оформление полученных результатов выполнены с помощью программы MS Excel 2016.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Распределение удельной активности ¹³⁷Cs в поверхностном слое и в профилях отобранных кернов донных отложений

В каждом образце поверхностного слоя донных отложений был обнаружен ¹³⁷Cs (табл. 1), активность которого в среднем и нижнем течении реки менялась от 4.4 до 69.0 Бк/кг. Подобная активность этого радионуклида определена в 2023 г. в донных отложениях СКК [33].

На ст. 7 в профиле вертикального распределения ¹³⁷Cs обнаружены три максимума удельной активности радионуклида: в поверхностном слое от 0 до 3 см, в подповерхностных слоях от 13 до 15 см и от 22 до 23 см (рис. 2). Верхний максимум концентрации ¹³⁷Cs (69 Бк/кг), по-видимому, связан с недавним поступлением радионуклида в речную экосистему в результате стока веществ с водосборной площади в период экстремальных паводков на р. Салгир в 2022 г. Расход воды во время этих событий превышал норму в семь раз [35]. Такие мощные стоки могли вымыть ¹³⁷Cs из его форм, ранее прочно связанных, “зафиксированных” в верхних горизонтах глинистых почв [5]. Средний максимум активности ¹³⁷Cs в керне (16 Бк/кг) определялся его поступлением в результате аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г., нижний максимум (10 Бк/кг) — залповыми выпадениями радионуклидов после испытаний ядерного оружия в 1962 г. Исходя из такой хронологии выпадений ¹³⁷Cs, скорость осадконакопления в водоемах определяют по глубине максимумов содержания оружейного и черновобельского ¹³⁷Cs в толще донных отложений [40]. По глубине залегания черновобельского ¹³⁷Cs 14 см рассчитанная средняя скорость осадконакопления в исследованном районе за 37-летний период, прошедший после аварии на ЧАЭС, составляет 0.37 см/год (рис. 2а). В этом случае при

неизменной скорости осадконакопления и в дочерновобельский период максимум содержания оружейного ¹³⁷Cs должен был залегать на глубине ~22.5 см. В исследуемом случае он обнаружен в слое от 22 до 23 см (рис. 2а). Это свидетельствует об устойчивой динамике седиментогенеза на ст. 7 в рассматриваемый интервал времени.

На ст. 13 зафиксированы два максимума концентрации ¹³⁷Cs: в верхнем слое осадков (44 Бк/кг) и в слое 15–16 см (10 Бк/кг) (рис. 2б). Верхний пик, как и на ст. 7, определяется недавними поступлениями в реку ¹³⁷Cs. Считаем, что второй пик можно соотнести с “черновобельским” выпадением ¹³⁷Cs, в этом случае скорость осадконакопления в этом керне составит 0.42 см/год. Разница скоростей осадконакопления на станциях 7 и 13 незначительная и может быть связана с различиями гидрофизических и биогеохимических процессов, происходящих на разных участках р. Салгир.

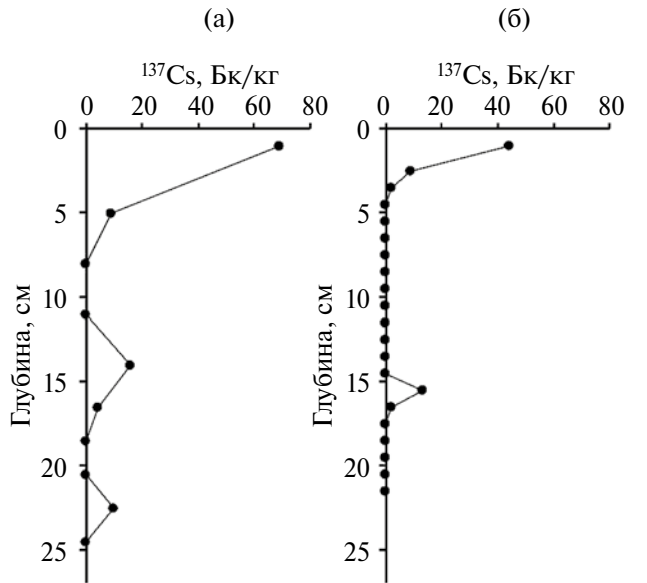


Рис. 2. Вертикальные профили удельной активности ¹³⁷Cs в донных осадках р. Салгир на ст. 7 (а) и 13 (б).

Таблица 1. Средняя удельная активность ¹³⁷Cs в поверхностном слое донных отложений р. Салгир

Номер станции	Район отбора	Дата отбора	Удельная активность ¹³⁷ Cs, Бк/кг ± σ
4	с. Красная зорька	29.09.2023	4.4±0.5
6	с. Новозуевка	29.09.2023	12.5 ± 1.1
7	с. Искра	29.09.2023	69.0 ± 7.2
12	с. Лиственное	13.10.2023	8.3 ± 0.9
13	с. Изобильное	13.10.2023	32.6 ± 3.4

Анализ поверхностного слоя донных отложений

Пробы донных отложений вдоль русла р. Салгир различались по гранулометрическому составу и были представлены песками разной степени заиленности и илами. Естественная влажность поверхностного слоя донных осадков варьировала от 22.9% в пробах с большим количеством гальки и мусора до 87.8% — в черных илах (табл. 2).

На первых трех станциях содержание $C_{орг}$ было относительно невысоким и изменялось в пределах 0.82–0.91%. В среднем течении на ст. 4–10 его содержание менялось от 1.91 до 5.63%, что указывает на накопление органического вещества в этих районах, а в нижнем течении вновь снизилось до 0.23% на ст. 12 и 1.19% — на ст. 13 (табл. 2).

Концентрация ДДЭ в поверхностном слое донных отложений менялась в широком диапазоне — от 3.19 до 143.69 нг/г, ДДД — от 1.22 до 23.85 нг/г, ДДТ — от 0.13 до 107.59 нг/г (табл. 2). Распределение ХОП по руслу имело очаговый характер (рис. 3). На первых двух станциях выявлена относительно низкая концентрация Σ ДДТ: на ст. 1 — 9.06 нг/г, ст. 2 — 12.92 нг/г. На ст. 3 содержание Σ ДДТ повысилось в >4 раз по сравнению с первыми станциями. Максимальная концентра-

ция Σ ДДТ (270 нг/г) зафиксирована на ст. 4 в районе с. Красная Зорька. В районе ст. 5 содержание пестицидов вновь оказалось невысоким (16 нг/г) и далее по течению постепенно увеличивалось до 256 нг/г на ст. 8 возле с. Пятихатка. В нижнем течении реки концентрация Σ ДДТ снизилась и составляла в среднем 30 нг/г на станциях 10–13.

Доля ДДЭ в сумме концентраций ДДТ и метаболитов менялась от 24 до 95% (в среднем — 65%), ДДД — от 6 до 33% (в среднем — 14%), ДДТ — от 0.4 до 58% (в среднем — 21%). Максимальная доля исходного пестицида ДДТ выявлена на ст. 2, где она составила 58%, также высокой она была на ст. 5 — 41, ст. 4 — 39, ст. 8 и 9 — 31%, что говорит о недавнем поступлении ДДТ в экосистему реки на этих станциях.

Результаты анализа кернов донных отложений

В керне на ст. 7 визуально наблюдалось два слоя различающихся по цвету грунтов: до глубины 20 см отложения были серого цвета, с 21 до 26 см цвет осадка переходил в темно-серый. Такой цвет донных осадков, как правило, встречается при отрицательном окислительно-восстановительном потенциале в них [4]. На ст. 13 цвет донных отложений по всей глубине керна был темно-коричневым.

Таблица 2. Район отбора проб, тип и физико-химические свойства грунтов и концентрация ДДТ и его метаболитов в поверхностном слое донных осадков р. Салгир

№	Район	Типы донных осадков	ЕВ, %	$C_{орг}$, %	ДДЭ, нг/г	ДДД, нг/г	ДДТ, нг/г	ДДТ/ ДДЭ
1	с. Доброе	Заиленный песок	28.2	0.85	5.67	1.66	1.73	0.31
2	с. Белоглинка	То же	30.5	0.91	3.19	2.13	7.60	2.38
3	с. Совхозное	Заиленный песок с галькой и ракушей	24.2	0.82	40.67	3.71	10.83	0.27
4	с. Красная зорька	Черный ил	87.8	5.63	143.69	19.44	107.59	0.75
5	с. Новоандреевка	То же	30.6	4.02	8.46	1.14	6.71	0.79
6	с. Новозуевка	Темно-серый ил	43.5	1.94	54.48	7.25	4.99	0.09
7	с. Искра	То же	46.1	3.55	111.08	12.66	11.39	0.10
8	с. Пятихатка	Песчанистый ил с галькой, мусором	22.9	2.74	158.89	15.36	81.64	0.51
9	с. Молочное	Ил с гнилостным запахом	40.2	1.91	23.76	23.85	24.07	1.01
10	с. Новогригорьевка	Ил	53.7	2.09	23.50	12.44	2.02	0.09
11	с. Семенное	То же	36.9	0.94	20.46	5.29	0.97	0.05
12	с. Лиственное	Песчанистый ил	29.2	0.23	28.46	1.22	0.13	0.01
13	с. Изобильное	Глинистый ил	36.2	1.19	31.22	2.93	0.28	0.01

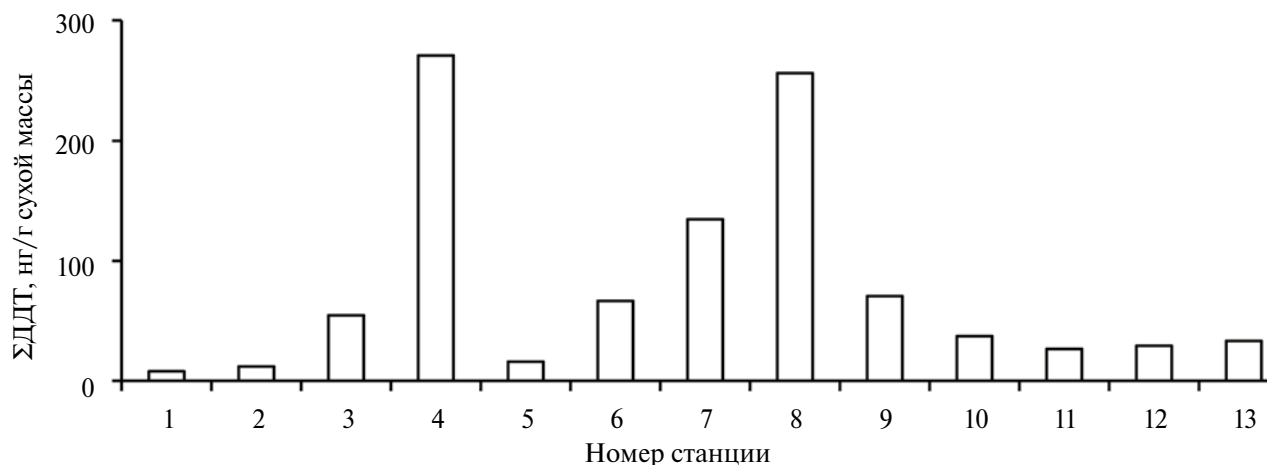


Рис. 3. Концентрация Σ ДДТ в поверхностном слое донных отложений р. Салгир.

В керне на ст. 7 выявлен тренд снижения ЕВ от верхних слоев к нижним. В слоях от 0 до 16 см содержание ЕВ менялось от 65 до 81% (в среднем — 71%). Эти значения свидетельствуют о преобладании тонкодисперсных фракций в грунте. В слоях от 17 до 21 см значения ЕВ колебались от 44 до 60% (в среднем — 54%). На глубине от 22 до 26 см среднее значение ЕВ осадков было наименьшим — 31% (рис. 4а).

В керне донных осадков на ст. 13 значения ЕВ варьировали в узком диапазоне — от 43 до 58%.

В верхних 12 см осадка ЕВ была ниже, чем в нижних слоях, — в среднем 46%, тогда как на глубине от 13 до 22 см она равнялась в среднем 54% (рис. 4а).

Содержание $C_{орг}$ в кернах на ст. 7 и 13 по-разному менялось с глубиной (рис. 4б). На ст. 7 отмечено статистически значимое снижение концентрации $C_{орг}$ с увеличением глубины, в то время как на ст. 13 подобного тренда не наблюдалось. В верхних слоях от 0 до 16 см среднее значение $C_{орг}$ составляло 1.95%, а глубже — от 17 до 22 см — отмечалось повышение содержания $C_{орг}$ в среднем до 2.84%.

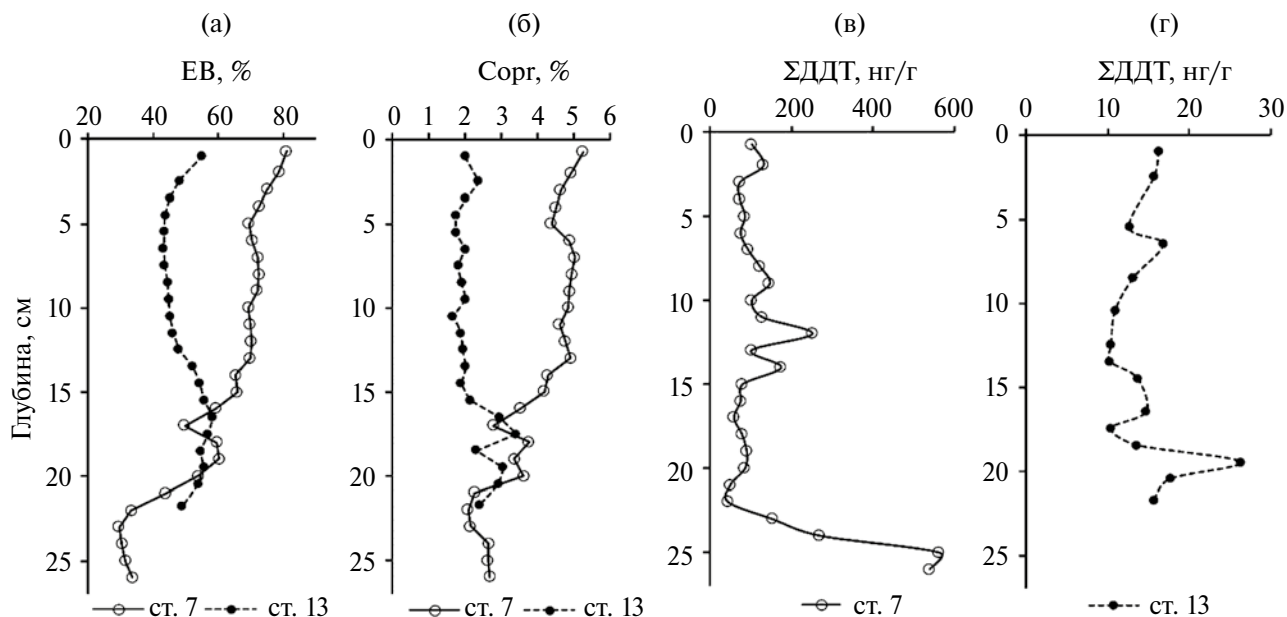


Рис. 4. Профили ЕВ (а), Сорг (б) и концентрации Σ ДДТ в кернах донных отложений р. Салгир на ст. 7 (в) и ст. 13 (г).

В среднем содержание $C_{орг}$ на ст. 7 от поверхностного слоя до глубины 16 см было в ~2.3 раза выше, чем на ст. 13. Это указывает на различные факторы воздействия и условия формирования верхних слоев осадка. В более глубоких слоях — от 17 до 22 см — в обоих районах с учетом погрешности определения среднее содержание $C_{орг}$ оказалось одинаковым и составило 2.98 и 2.84% соответственно (рис. 4б).

В колонке грунта на ст. 7 концентрация $\Sigma ДДТ$ менялась в широком диапазоне — от 44.3 до 561.7 нг/г (в среднем — 143.9 нг/г). В профиле ее распределения наблюдаются два максимума: первый в слое 11–12 см (250 нг/г), второй — в слое от 21 до 26 см (562 нг/г) (рис. 4в).

Средняя концентрация $\Sigma ДДТ$ в керне в слоях от 0 до 22 см на ст. 13 была ниже в 7 раз, чем в этом же интервале глубин на ст. 7, и изменялась в узком интервале от 10 до 26 нг/г (в среднем — 14.4 нг/г) (рис. 4г). Повышенное содержание $\Sigma ДДТ$ определено в последних слоях керна в интервале с 19 до 22 см.

Распределение ДДТ и метаболитов в кернах донных отложений

Качественный состав ДДТ в колонке на ст. 7 был представлен как исходным пестицидом, так и его метаболитами. В профиле распределения наблюдалось резкое изменение концентраций

метаболитов ДДЭ и ДДД глубже 22 см. С поверхностного слоя до 22 см доля ДДЭ в сумме концентраций $\Sigma ДДТ$ составляла в среднем 59%, в более глубоких слоях она существенно снизилась и стала равна 7%, а доля ДДД увеличилась в этих интервалах глубин в среднем с 32 до 92% (рис. 5).

На ст. 13 исходный пестицид ДДТ был обнаружен только в слое от 6 до 7 см. В суммарной концентрации преобладал ДДЭ, его доля во всех слоях грунтов менялась от 54 до 91% (в среднем — 82%).

ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение уровня концентрации загрязнителей с нормативами

В РФ существуют только региональные допустимые уровни (ДУ) содержания ДДТ в донных осадках [28], где для $\Sigma ДДТ$ установлен безопасный уровень в 2.5 нг/г, при концентрации $\Sigma ДДТ$ от 2.5 до 10 нг/г осадки считаются слабозагрязненными, при более высокой концентрации — загрязненными. По этим нормам донные отложения на ст. 1 — слабозагрязненные по $\Sigma ДДТ$, в остальных районах — загрязненные.

Максимальная активность ^{137}Cs (69 Бк/кг) в верхнем слое осадков в районе с. Искра существенно превышала содержание радионуклида в других районах р. Салгир, но была значительно ниже норм, принятых в РФ для морских донных осадков (1.5×10^3 Бк/кг сырой массы) [31], и минимально значимой удельной активности для ^{137}Cs , равной 104 Бк/кг [32].

Трансформация ДДТ в донных осадках р. Салгир

В донных осадках ДДТ подвергается различным метаболическим процессам в зависимости от геохимических условий. Ранее было показано, что соотношение метаболитов ДДТ в донных осадках разнотипных водоемов Гераклейского п-ова (Крым) зависело от окислительно-восстановительной обстановки: в анаэробных условиях в бух. Севастопольской ДДТ трансформировался в ДДД, в аэробных в р. Черной — в ДДЭ [27]. В поверхностном слое

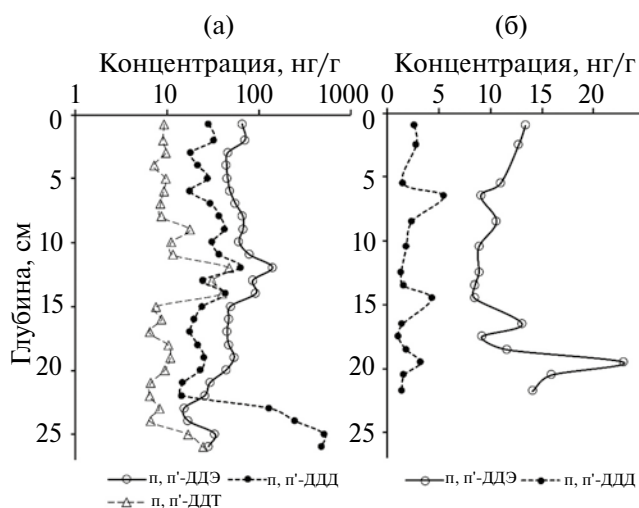


Рис. 5. Распределение ДДТ и его метаболитов в кернах донных отложений на ст. 7 (а) и на ст. 13 (б).

донных отложений р. Салгир, в керне на ст. 13 и в верхних слоях керна на ст. 7 отношение концентрации ДДЭ и ДДД (в среднем 7.5, 6.0, 2.2 соответственно) свидетельствует о преобразовании ДДТ микроорганизмами в аэробных условиях. В нижних слоях керна на ст. 7 среднее значение индекса ДДЭ/ДДД было 0.07, что говорит об анаэробной деструкции ДДТ в восстановительных условиях.

По соотношению концентраций исходного ДДТ и метаболитов можно оценить время поступления пестицида в экосистему: если отношение ДДТ/ДДЕ > 0.33 , то такое загрязнение считается свежим [46]. На пяти станциях (2, 4, 5, 8, 9) это соотношение существенно > 0.33 (табл. 2), что свидетельствует о недавнем поступлении ДДТ в эти районы. Наибольшие величины этого отношения определены у сел Белоглинка (ст. 2) и Молочного (ст. 9), а также в районах максимального загрязнения на ст. 4 у с. Красная Зорька и на ст. 8 у с. Пятихатка.

Факторы, влияющие на содержание и распределение ДДТ в русле р. Салгир

Русло р. Салгир по уровню антропогенного воздействия ранее было подразделено на несколько зон. Отмечена городская зона интенсивного воздействия, где ниже Симферополя в реку сбрасываются канализационные стоки города [22]. Тем не менее значительного загрязнения ДДТ в донных отложениях Салгира в районе Симферополя не отмечено. К наиболее трансформированным зонам реки по аккумуляции ХОП относится участок русла Салгира от с. Красная Зорька до с. Пятихатка. Причиной поступления ДДТ в экосистему реки в этом районе мог быть смыв остаточных количеств этого пестицида с полей, расположенных на территориях водосборного бассейна Салгира, на которых еще в конце 1980-х гг. для борьбы с вредителями вносили в среднем 6 кг/га пестицидов, в том числе ДДТ [8, 37].

Высокие уровни загрязнения, неравномерный очаговый характер распределения ДДТ, выявление исходного пестицида в донных осадках реки свидетельствуют о том, что в районах ст. 4, 7 и 8 существуют локальные

источники ДДТ. Таковыми могли быть склады с устаревшими пестицидами. Есть данные, что на территории Крыма на 28 полигонах твердых отходов накоплено 866.9 т запрещенных и неопознанных пестицидов, а неофициальные свалки устаревших пестицидов никогда не учитывались [14]. В многочисленных публикациях в СМИ упоминается вывоз устаревших пестицидов из Крыма в 2010-х гг. для их утилизации в Германии [6, 7, 19, 20], но не ясно, насколько эффективные меры при этом были предприняты для предотвращения загрязнения почвы и водотоков. Результаты настоящего исследования показывают, что высокое загрязнение ДДТ в нескольких районах Салгира могло произойти в случае экологически небезопасной переупаковки и транспортировки пестицидов. В дальнейшем необходимо провести исследование почвы на территории этих населенных пунктов.

В нижнем течении реки загрязнение донных отложений оказалось существенно ниже, чем в среднем, это может быть следствием потенциальных возможностей самоочищения р. Салгир под влиянием стока воды основного притока — р. Биюк-Карасу.

Сравнение загрязненности донных отложений Салгира с данными в других реках показало, что концентрация Σ ДДТ в грунтах среднего течения Салгира оказалась наиболее высокой среди сравниваемых районов (табл. 3).

Для выявления взаимосвязи между геохимическими свойствами донных отложений и концентрацией загрязнителей был проведен корреляционный анализ (табл. 4). Полученные результаты указывают на умеренную положительную связь $C_{орг}$ и ЕВ с концентрацией ДДТ и его метаболитов, но эта связь не является статистически значимой ($p > 0.05$). Вероятно, органические вещества и грансостав осадков могут влиять на адсорбцию и транспортировку загрязнителей в донных отложениях, но основной фактор, определяющий неравномерное распределение пестицидов по руслу реки, — поступление этих веществ в ее экосистему из локальных источников.

Таблица 3. Концентрация Σ ДДТ в поверхностном слое речных донных отложений

Реки	Дата	Диапазоны (среднее) Σ ДДТ, нг/г сухой массы	Источник
Эстуарные зоны рек бассейна зал. Петра Великого	2012 г.	6.3–44.7	[24]
р. Ямуна, Дели, (Индия)	Июнь 2018 г.	0.4–18.0	[44]
р. Сомешул-Мик, (Румыния)	Май 2017 г.	1.0–39.2	[41]
р Селе, Южная Италия	Апрель 2020–2021 гг.	0.1–6.1	[42]
Устье р. Черной (юго-восток Крыма)	2020–2021 гг.	7.3–13.6 (10.0)	[27]
р. Салгир	2023 г.	9.1–270.7 (78.7)	д. и. *

* Данное исследование.

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между содержанием $C_{орг}$, ЕВ, ДДЭ, ДДД, ДДТ в поверхностном слое донных отложений р. Салгир

Компонент	$C_{орг}$	ЕВ	ДДЭ	ДДД	ДДТ
$C_{орг}$	1				
ЕВ	0.77	1			
ДДЭ	0.43	0.42	1		
ДДД	0.32	0.56	0.59	1	
ДДТ	0.47	0.53	0.84	0.65	1

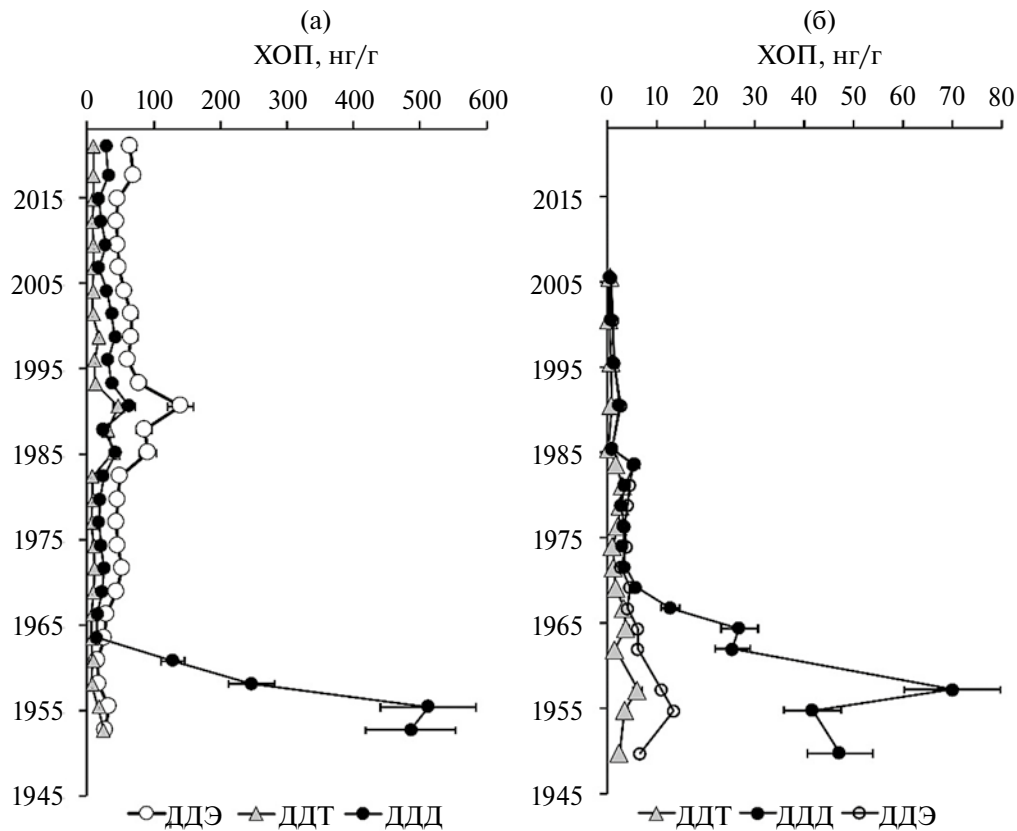


Рис. 6. Вертикальное распределение ДДТ и его метаболитов в донных отложениях р. Салгир на ст. 7 (а) в 2023 г. и Чернореченского водохранилища в 2008 г.(б) [25].

*Геохронология распределения ДДТ и его метаболитов
в кернах донных осадков*

Оценка скоростей осадконакопления в реках — сложная задача, особенно в условиях паводкового характера рек, когда реки могут превращаться в мощные потоки, транспортирующие большие объемы вещества различного генезиса. Для предотвращения наводнений р. Салгир была зарегулирована, и в 1955 г. было построено Симферопольское водохранилище [29].

Скорость осадконакопления на ст. 7 оказалась равномерной по глубине керна. Это может быть связано с тем, что гидродинамические изменения, вызванные зарегулированием стока реки, снизили значительные колебания уровня воды, что повлияло на сглаживание межгодовых различий в накоплении осадочного материала.

Известно, что в настоящее время в донных отложениях морей и пресноводных водоемов Азии и Европы средний уровень активности ^{137}Cs , которая соответствует периодам максимума глобальных ядерных испытаний и аварии на ЧАЭС, составляет 10–20 Бк/кг [30]. Активность ^{137}Cs в заглубленных слоях кернов на ст. 7 и 13 ≤ 16 Бк/кг (рис. 2), что свидетельствует об их соответствии современному фону. А повышенная активность в поверхностных слоях в этих районах говорит о наличии значимых источников поступления ^{137}Cs в современный период.

Анализ вертикального распределения соединений группы ДДТ в профиле керна с датированными слоями выявил на ст. 7 увеличение содержания ХОП с максимумом в слоях осадка, соответствующих периоду накопления в 1950–1960 гг. (рис. 6а).

Необходимо отметить, что подобный профиль распределения наблюдали в донных отложениях Чернореченского водохранилища [25], на котором максимум концентрации ДДТ и метаболитов также относился к периоду 1950–1956 гг. (рис. 6б), что свидетельствует о схожести ведения сельскохозяйственных мероприятий на территории Крыма в этот период. Различия распределения ХОП наблюдалось только в их кон-

центрациях, которые в Салгире были в среднем в десять раз выше, чем в водохранилище.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено заметное различие загрязнения по ДДТ и ^{137}Cs донных отложений в верхнем, среднем и нижнем течении р. Салгир, которое имело неравномерный очаговый характер пространственного распределения. Максимальное содержание $\Sigma\text{ДДТ}$, превышающее ориентировочно допустимые уровни в донных отложениях более чем в 10 раз, выявлено в среднем течении реки. В этих районах доля ДДТ в его суммарной концентрации с метаболитами составляла $>40\%$. Соотношение метаболита ДДЭ и ДДТ указывает на “свежее” поступление исходного пестицида в экосистему реки. Содержание ^{137}Cs в донных отложениях в районах сел Искра и Изобильного в нижнем течении реки было выше фоновых значений, что свидетельствует о его современном поступлении в районы исследования. Определен период максимальной загрязненности ДДТ донных отложений в среднем течении реки, соответствующий 1950–1960 гг. Локальное присутствие запрещенных пестицидов в донных осадках — долговременный источник загрязнения воды р. Салгир. Требуется принятие мер для выявления источников поступления загрязнителей и защиты ее экосистемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агапкина Г.И., Столбова В.В., Бродский Е.С., Шелепчиков А.А., Фешин Д.Б. Приоритетные органические загрязнители в почве дендропарка Ботанического сада МГУ имени МВ Ломоносова. Сообщение 2. Особенности вертикального распределения полициклических ароматических углеводородов в профиле урбо-дерново-подзолистой почвы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2015. № 3. С. 37–45.
2. Алексахин И.В., Клименко А.Н., Горбунов Р.В. Анализ плотности загрязнения радионуклидами ^{137}Cs и ^{90}Sr физико-географических областей Крыма // Уч. зап. Таврического нац. ун-та. Сер. География. 2010. Т. 23 (62). № 1. С. 3–9.
3. Андрияшина Т.В., Саратовских Е.А., Чепегин И.В., Чижова М.А. Исследование содержания техногенных загрязняющих веществ в почвах Орловской

- области // Вестн. Казанского технол. ун-та. 2013. Т. 16. № 4. С. 67–72.
4. Батоян В.В., Моисеенков О.В. Оценка техногенного воздействия на водохранилище по донным отложениям // Вестн. МГУ. Сер. геогр. 1983. № 3. С. 65–71.
 5. Булгаков А.А. Моделирование фиксации ^{137}Cs в почвах // Почвоведение. 2009. № 6. С. 726–731
 6. В Крыму из захоронения под Судакком вывезли 11 т пестицидов и отравленной земли. <https://www.ecoindustry.ru/NEWS/view/37896.html?ysclid=lryovvd1ak200635350>
 7. В этом году из Крыма вывезли более 300 тонн пестицидов. https://agrobeltarus.by/news/rossiya_i_sng/v_etom_godu_iz_kryma_vyvezli_bolee_300_tonn_pestitsidov/?ysclid=lryouyp3cm596949021
 8. Галиулин Р.В., Галиулина Р.А., Хоробрых Р.Р., Башкин В.Н. Риск современного загрязнения речных вод пестицидами ДДТ и ГХЦГ // Проблемы анализа. 2019. Т. 16(5). № 62–69. doi:10.32686/1812-5220-2019-16-5-62-69
 9. ГОСТ 26213–91. Почвы. Методы определения органического вещества. М.: Изд-во стандартов, 1992. 8 с.
 10. ГОСТ Р 53217–2008 (ИСО 10382:2002). Качество почвы. Определение содержания хлорорганических пестицидов и полихлорированных бифенилов. Газохроматографический метод с электронозахватным детектором. М.: Стандартинформ, 2009. 20 с.
 11. Гулин С.Б. Радиоизотопная геохронологическая реконструкция загрязнения и эвтрофикации Черного моря // Радиоэкологический отклик Черного моря на чернобыльскую аварию / Под ред. Г.Г. Поликарпова, В.Н. Егорова. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. С. 519–547.
 12. Гулин С.Б., Егоров В.Н., Стокозов Н.А., Мирзоева Н.Ю. Определение возраста донных отложений и оценка скорости осадконакопления в прибрежных и глубоководных акваториях Черного моря с использованием природных и антропогенных радионуклидов // Радиоэкологический отклик Черного моря на чернобыльскую аварию / Под ред. Г.Г. Поликарпова, В.Н. Егорова. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. С. 499–518.
 13. Гулин С.Б., Мирзоева Н.Ю., Лазоренко Г.Е., Егоров В.Н., Трапезников А.В., Сидоров И.Г., Проскурнин В.Ю., Поповичев В.Н., Бей О.Н., Родина Е.А. Современная радиоэкологическая ситуация, связанная с режимом функционирования Северо-Крымского канала // Радиацион. биология. Радиоэкология. 2016. Т. 56. № 6. С. 1–8.
 14. Дубровин И.Р., Дубровин Е.Р. К вопросу об экологической безопасности автономной Республики Крым // Техничко-технол. проблемы сервиса. 2017. Т. 4. № 42. С. 24–28.
 15. Егоров В.Н., Поликарпов Г.Г., Стокозов Н.А., Мирзоева Н.Ю. Баланс и динамика полей концентраций ^{137}Cs и ^{90}Sr // Радиоэкологический отклик Черного моря на чернобыльскую аварию / Под ред. Г.Г. Поликарпова, В.Н. Егорова. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. С. 217–251.
 16. Ежегодник содержания остаточных количеств пестицидов в объектах природной среды Советского Союза Кн. II. Обнинск: Госкомгидромет, 1988. 132 с.
 17. Зыбалов В.С., Крупнова Т.Г. Исследование содержания хлорорганических пестицидов в объектах окружающей среды на территории Челябинской области // Вестн. Южно-Уральского гос. ун-та. Сер. Химия. 2014. Т. 6. № 3. С. 39–43.
 18. Иванютин Н.М., Подовалова С.В., Кременской В.И. Водоборот и антропогенная нагрузка в бассейне реки Салгир // Науч. журн. Рос. НИИ проблем мелиорации. 2016. № 4 (24). С. 174–188.
 19. Из Крыма вывезли все пестициды? <http://www.sobytiya.info/news/11/16930?ysclid=lryovcrzot468868891>
 20. Из Крыма вывезли последнюю партию непригодных ядохимикатов. <https://argumenti.ru/society/2013/01/224822?ysclid=lryoul2siw253480896>
 21. Качество поверхностных вод Российской Федерации. Информация о наиболее загрязненных водных объектах Российской Федерации (приложение к Ежегоднику за 2020 г.). М.: Росгидромет, 2021. 160 с.
 22. Киселева Г.А., Прокопов Г.А. Выделение участков реки с различной степенью антропогенной преобразованности (на примере р. Салгир) // Устойчивый Крым. Водные ресурсы. Симферополь: Таврида, 2003. С. 139–141.
 23. Куликова-Хлебникова Е.Н., Робертус Ю.В., Кивацкая А.В. Особенности метаболизма хлорорганических пестицидов в объектах окружающей среды в условиях Горного Алтая // Вестн. Алтайского гос. аграрного ун-та. 2011. № 10 (84). С. 50–53.
 24. Лукьянова О.Н., Бродский Е.С., Чуйко Г.М. Стойкие органические загрязняющие вещества в донных отложениях эстуарных зон трех рек залива Петра Великого (Японское море) // Вестн. Тюменского гос. ун-та. Сер. Экология. 2012. № 12. С. 119–126.

25. Малахова Л.В., Егоров В.Н., Гулин С.Б., Малахова Т.В., Мосейченко И.Н. Многолетняя динамика содержания хлорорганических соединений и ртути в донных осадках Чернореченского водохранилища // Вод. ресурсы. 2019. Т. 46. № 4. С. 417–423. doi: 10.31857/S0321-0596464417-423
26. Малахова Л.В., Карпова Е.П., Белогурова Р.Е., Губанов В.В., Прокопов Г.А., Чеснокова И.И., Куршаков С.В., Статкевич С.В., Шавриев Д.Г., Овечко С.В. Хлорорганические ксенобиотики в экосистеме реки Салгир: содержание, распределение, экологический риск // Экол. безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 4. С. 116–133.
27. Малахова Л.В., Лобко В.В., Малахова Т.В., Мурашова А.И. Сравнительная оценка хлорорганического загрязнения донных отложений разнотипных водных объектов Севастопольского региона (Крым) // Химия в интересах устойчивого развития. 2022. Т. 30. № 2. С. 174–185.
28. Нормы и критерии оценки загрязненности донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга. Региональный норматив. СПб., 1996. 19 с.
29. Олиферов А.Н., Тимченко З.В. Реки и озера Крыма. Симферополь: Доля, 2005. 214 с.
30. Опекунов А.Ю., Пичугина Д.В., Жеребчевский В.И., Опекунова М.Г. Изучение радионуклидного состава донных отложений рек Санкт-Петербурга // Изв. РАН. Сер. физическая. 2022. Т. 86. № 8. С. 1184–1189.
31. Р 52.18.873-2018 Рекомендации. Порядок расчета контрольных уровней содержания радионуклидов в донных отложениях морских водных объектов. Обнинск, 2019. 25 с.
32. Санитарные нормы и правила СанПиН 2.6.1.2523-09 “Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009” от 01.09.2009.
<http://docs.cntd.ru/document/902170553>
33. Сидоров И.Г., Мирошниченко О.Н., Мирзоева Н.Ю., Мосейченко И.Н., Вахрушев М.О. ^{137}Cs в водной экосистеме Северо-Крымского канала по результатам экспедиционных исследований 2022–2023 гг. // Актуальные вопросы водных и прибрежных экосистем. Сб. материалов Всерос. конф., посвящен. 90-летию со дня рождения О.Г. Миронова. Севастополь: ФИЦ ИнБЮМ, 2023. С. 33–34.
34. Стокозов Н.А. Методика определения радиоизотопов цезия в объектах окружающей среды // Радиоэкологический отклик Черного моря на чернобыльскую аварию / Под ред. Г.Г. Поликарпова, В.Н. Егорова. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. С. 62–70.
35. Такого не было десятки лет: крымские гидрологи оценили паводок на Салгире.
<https://sevastopol.su/news/takogo-ne-bylo-desyatki-let-krymskie-gidrologi-ocenili-pavodok-na-salgire>
36. Трегер Ю.А. Стокгольмская конвенция о стойких органических загрязнителях. Пути ее реализации в Российской Федерации // Хим. физика. 2012. Т. 31. № 10. С. 33–37.
37. Федоров Л.А., Яблоков А.В. Пестициды-токсический удар по биосфере и человеку. М.: Наука, 1999. 462 с.
38. Яблоков А.В. Ядовитая приправа. Проблемы применения ядохимикатов и пути экологизации сельского хозяйства. М.: Мысль, 1990. 126 с.
39. Anderson R.F., Schiff S.L., Hesslein R.H. Determining sediment accumulation and mixing rates using ^{210}Pb , ^{137}Cs , and other tracers: problems due to postdepositional mobility and coring artefacts // Canadian J. Fisheries Aquatic Sci. 1987. № 44. P. 231–250.
40. Appleby P.G. Sediment records of fallout radionuclides and their application to studies of sediment-water interactions // Water, Air and Soil Pollution. 1991. № 99. P. 573–586.
41. Barhoumi B., Beldean-Galea M.S., Al-Rawabdeh A.M., Roba C., Martonos I.M., Bălc R., Kahlaoui M., Souffiane T., Tedetti M., Driss M.R., Baciuc C. Occurrence, distribution and ecological risk of trace metals and organic pollutants in surface sediments from a Southeastern European river (Someșu Mic River, Romania) // Sci. Total Environ. 2019. № 660. P. 660–676.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.428>
42. De Rosa E., Montuori P., Triassi M., Masucci A., Nardone A. Occurrence and Distribution of Persistent Organic Pollutants (POPs) from Sele River, Southern Italy: Analysis of Polychlorinated Biphenyls and Organochlorine Pesticides in a Water–Sediment System // Toxics. 2022. 10. P. 662.
43. Fox W., Connor L., Copplestone D., Johnson M., Leah R. The organochlorine contamination history of the Mersey estuary, UK, revealed by analysis of sediment cores from salt marshes // Mar. Environ. Res. 2001. 51. P. 213–227.
44. Kumar B., Verma V.K., Mishra M., Piyush Kakka, V., Tiwari A., Kumar S., Yadav V.P., Gargava P. Assessment of persistent organic pollutants in soil and sediments from an urbanized flood plain area // Environ. Geochem. Health. 2021. 43. P. 3375–3392.
<https://doi.org/10.1007/s10653-021-00839-9>

45. Liber Y., Mourier B., Marchand P., Bichon E., Perrodin Y., Bedell J.P. Past and recent state of sediment contamination by persistent organic pollutants (POPs) in the Rhône River: Overview of ecotoxicological implications // *Sci. Total Environ.* 2019. 646. P. 1037–1046.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.340>
45. Mora de S., Villeneuve J.-P., Sheikholislami M.R., Cattini C., Tolosa I. Organochlorinated compounds in Caspian Sea sediments // *Mar. Poll. Bull.* 2004. 48. P. 30–43.
46. Peivasteh-Roudsari L., Barzegar-Bafrouei R., Sharifi K.A., Azimialim S., Karami M., Abedinzadeh S., Tajdar-oranj B., Mahdavi V., Alizadeh A.M., Sadighara P., Ferrante M., Conti G.O., Aliyeva A., Khaneghah A.M. Origin, dietary exposure, and toxicity of endocrine-disrupting food chemical contaminants: A comprehensive review. // *Heliyon*. 2023. 9. Iss. 7. P. e18140.
doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e18140
47. Tudi M., Daniel Ruan H., Wang L., Lyu J., Sadler R., Connell D., Chu C., Phung D.T. Agriculture Development, Pesticide Application and Its Impact on the Environment // *Int. J. of Environ. Res. Public Health*. 2021. 18 (3). P. 1112.
<https://doi.org/10.3390/ijerph18031112>
48. Vasseghian Y., Hosseinzadeh S., Khataee A., Dragoi E.N. The concentration of persistent organic pollutants in water resources: a global systematic review, meta-analysis and probabilistic risk assessment // *Sci. Total Environ.* 2021. 796. P. 149000
doi:10.1016/j.scitotenv.2021.149000

ASSESSMENT OF THE SPATIAL AND TEMPORAL DISTRIBUTION OF DDT, ITS METABOLITES, AND CESIUM-137 IN THE SEDIMENTS OF THE SALGIR RIVER (CRIMEA)

**L. V. Malakhova^{a, b, *}, N. Yu. Mirzoeva^a, I. N. Moseychenko^{a, b}, V. V. Voitsekhovskaya^{a, b},
T. V. Malakhova^a, S. V. Ovechko^b**

^aResearch Center for Freshwater and Brackish Water Hydrobiology, Sevastopol, 299011, Russia

^bA.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, 299011, Russia

*e-mail: malakh2003@list.ru

Spatial and temporal changes in the content and distribution of the organochlorine pesticide p,p'-dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT), its metabolites, and cesium-137 have been studied in the sediments of the longest river in Crimea, the Salgir. The spatial distribution of Σ DDT and cesium-137 concentrations exhibited an uneven, focal pattern. The highest levels of Σ DDT, exceeding the approximately permissible levels in sediments by more than 10 times, were found in the middle reaches of the river, near the villages of Krasnaya Zorya and Pyatikhata (270 and 256 ng/g of dry mass, respectively). In these areas, DDT accounted for over 40% of the total concentration of DDT and its metabolites. The ratio of the metabolite DDE to DDT suggests recent input of the original pesticide into the river's ecosystem. The activity of ^{137}Cs in the surface layer of sediments ranged from 4.4 to 69 Bq/kg of dry mass. Geochronological analysis of ^{137}Cs distribution in sediment cores from the middle reaches of the river enabled the determination of sedimentation rates, sediment dating, and the reconstruction of Σ DDT input into the river's sediments from the 1950s to the present. A period of maximum DDT contamination in the sediments was identified in the middle reaches of the river, corresponding to the 1950s-60s. The detection of high levels of banned pesticides in the surface layers of sediments points to local sources of contamination, highlighting the need for measures to identify these sources and protect the river ecosystem from further pollution.

Keywords: DDT and its metabolites, cesium-137, bottom sediments, Salgir River, Crimea

УДК 628.17:628.3

ТРАНСФОРМАЦИЯ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ КРЫМ И г. СЕВАСТОПОЛЕ В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ¹

© 2024 г. А. П. Демин*, А. В. Зайцева, И. А. Вишневская

Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

**e-mail: deminar@mail.ru*

Поступила в редакцию 16.03.2024 г.

После доработки 16.04.2024 г.

Принята к публикации 16.04.2024 г.

Проведена аналитическая оценка трансформации водохозяйственного и мелиоративного комплекса Крыма в условиях дефицита водных ресурсов на основе системного и информационно-аналитического подходов с применением методов логического и сравнительного анализа, качественного и количественного анализа статистических данных. Выявлено резкое изменение структуры забора пресной воды. За 2014–2022 гг. утечки и потери в водопроводной сети Республики Крым выросли на 44%. Здесь ежегодно заменяется от 0.5 до 1.8% протяженности сети, требующей замены, в г. Севастополе – от 0.1 до 1.3%, что крайне мало. Среднесуточное водопотребление населения в Республике Крым с учетом роста количества отдыхающих за этот период снизилось с 134 до 101 л, в г. Севастополе – с 184 до 98 л. В настоящее время только 3/4 городского населения Республики Крым и <2/3 сельского населения обеспечены качественной питьевой водой. После перекрытия Северо-Крымского канала площадь поливаемых земель сократилась в 7–8 раз. Резкий рост дефицита воды в сельском хозяйстве привел к стремительному росту самого экономного способа полива – капельного. Показана роль орошения в производстве важнейших продуктов земледелия. Выявлено, что доля загрязненных сточных вод растет, а доля нормативно очищенных вод снижается. В Республике Крым отмечается как снижение, так и рост сброса массы отдельных загрязняющих веществ. Качество воды большинства рек Крыма не ухудшается. В 2022 г. >97% основных загрязняющих веществ, содержащихся в сточных водах г. Севастополя, сбрасывалось непосредственно в Черное море и главные водотоки (реки Черная, Бельбек, Кача) ими не загрязнялись.

Ключевые слова: Республика Крым, Севастополь, дефицит водных ресурсов, хозяйственно-бытовое и питьевое водоснабжение, удельное водопотребление, оборотное водоснабжение, орошение, загрязненные и нормативно очищенные воды, сброс загрязняющих веществ, качество воды.

DOI: 10.31857/S0321059624060136 EDN: VOBWW

ВВЕДЕНИЕ

Крым – наиболее водоемкий регион Российской Федерации (а также Европы). Объем возобновляемых водных ресурсов на душу населения составляет здесь, по разным оценкам, от 400 до 700 м³/год. По классификации ФАО ООН Крым относится к регионам мира с “абсолютным” дефицитом водных ресурсов [6].

Водная блокада, введенная Украиной в апреле 2014 г., коренным образом изменила водохозяй-

ственный баланс на полуострове, так как ~85% потребности региона в воде удовлетворялось за счет переброски днепровской воды. Прекратило существование рисоводство, практически исчезло прудовое рыбоводство, в бедственном положении оказались другие водоемкие отрасли экономики. В некоторых городских округах и муниципальных районах в годы малой водности источников есть угроза дефицита водных ресурсов. Качество воды в отдельных районах не соответствует требованиям Роспотребнадзора. Некоторые территории и потребители не охвачены централизованным водоснабжением, в других степень надежности и бесперебойность предоставления услуг водоснабжения довольно низки. Высока степень потерь воды при ее транспортировке потребителям [11].

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема FMWZ-2022-0001).

В последние годы от 1 до 3% населения Республики Крым обеспечивается привозной водой. Не снижается число заболеваний, связанных с качеством воды. Хлорирование сточных вод не обеспечивает необходимой степени обеззараживания, что приводит к сбросу недостаточно очищенных и необеззараженных вод в районе рекреационного водопользования [5].

Довольно мало работ, в которых комплексно анализируются проблемы трансформации водохозяйственного и мелиоративного комплексов Крыма в современный период [4, 6]. Большинство публикаций имеет узко региональный характер, в них фрагментарно исследуются отдельные вопросы водного хозяйства и мелиораций, данные обычно приводятся за небольшое число лет [2, 3, 8, 14, 20].

Однако вопросы изменения объемов и структуры водопотребления и водоотведения на территории Крыма, особенностей преобразования промышленного и орошаемого секторов Крыма в результате резкого усиления водного дефицита с 2014 г., изменений количества сбросов загрязняющих веществ (ЗВ) и их влияние на качество воды в поверхностных водных объектах остаются недостаточно изученными.

Цель статьи — комплексная аналитическая оценка трансформации водохозяйственного и мелиоративного комплекса Крыма в условиях дефицита водных ресурсов, возникшего в результате перекрытия Северо-Крымского канала (СКК).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходных материалов для анализа изменений объемов забираемых и отводимых в поверхностные водные объекты Крымского п-ова сточных вод, а также сброса ЗВ в их составе использовались данные государственной статистической отчетности (форма 2-ТП (водхоз)) за период 2014–2022 гг., содержащиеся в материалах автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов Российской Федерации [7]. Для оценки изменения водообеспечения населения привлекались материалы Управления федеральной

службы госстатистики по Республике Крым и г. Севастополю по состоянию водопроводно-канализационного хозяйства [15, 16], современным демографическим показателям, информация министерства курортов и туризма Республики Крым по динамике числа отдыхающих [17, 19], данные единой межведомственной информационно-статистической системы по обеспеченности населения качественной питьевой водой [12]. Использовались доклады межрегионального управления Роспотребнадзора, отдельные научные публикации [3, 5].

Для оценки развития сельского хозяйства и орошаемого земледелия Крыма в условиях дефицита водных ресурсов анализировались статистические материалы Госкомводхоза Республики Крым по наличию и использованию орошаемых земель, проведению поливов, валовому сбору продукции растениеводства на орошаемых землях, продуктивности орошаемых угодий, а также отдельные публикации [1, 2, 8–10, 14, 20]. Анализ динамики качества поверхностных вод выполнен на основе данных гидрохимической сети Росгидромета [13], докладов о состоянии и охране окружающей среды на территории Республики Крым [11], а также научных публикаций [4, 6].

В соответствии с поставленными задачами исследование проведено на основе системного и информационно-аналитического подходов с применением методов логического и сравнительного анализа, качественного и количественного анализа статистических данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Забор воды из природных водных объектов и ее использование на различные нужды

За 2014–2021 г. забор пресной воды на территории Республики Крым вырос с 306 до 318 млн м³, или на 4.0% (рис. 1) [7]. При этом резко изменилась структура забора пресной воды из разных источников. Если в 2014 г. из поверхностных источников забиралось 237 млн м³, то в 2021 г. только 110 млн м³ — почти в 2.2 раза меньше. В то же время забор воды из подземных источников за эти годы вырос с 69 до 191 млн м³,

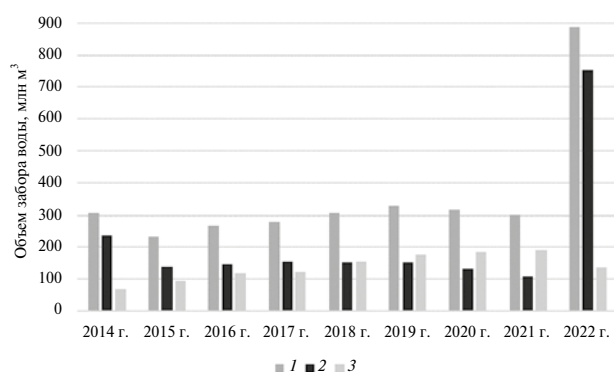


Рис. 1. Динамика объема забора пресной воды на территории Республики Крым, млн м³: 1 — всего; 2 — из поверхностных источников; 3 — из подземных источников.

или в 2.8 раза. Для обеспечения потребности в водных ресурсах пришлось строить водозаборы на новых подземных месторождениях и увеличивать производительность на старых месторождениях. В 2022 г. с возобновлением работы СКК забор воды из поверхностных источников резко вырос — до 753 млн м³, или в 6.8 раза по сравнению с предыдущим годом.

В городе федерального значения Севастополе объем забора пресной воды за этот период почти не изменился. За 2014–2021 гг. объем забора воды из поверхностных источников снизился с 40.4 до 33.9 млн м³, или на 16%, а из подземных источников — увеличился с 15.7 до 23.3 млн м³, или на 36%. В 2022 г. показатели забора воды вернулись к первоначальному состоянию.

Опреснение морской воды позволяет экономить дефицитную пресную воду для технических нужд. Забор морской воды в Республике Крым колебался в анализируемый период в пределах 5–27 млн м³ в год. Основной (на 80–95%) потребитель морской воды в республике — городской округ (ГО) Керчь. В Севастополе с вводом в эксплуатацию Балаклавской ТЭС в марте 2019 г. забор морской воды сократился с 40–43 до 5 млн м³ в год.

Объем использования пресной воды в Республике Крым после возвращения в состав России сначала снижался из-за недостатка воды в источниках водоснабжения и роста потерь воды при ее транспортировке к потребителям, но с 2018 г. вновь стал расти в результате введения в строй новых месторождений подземных вод и строительства и реконструкции водохранилищ поверхностных вод. В 2022 г. он значительно вырос в связи с возобновлением работы СКК. Всего объем используемых пресных вод в республике увеличился с 213 млн м³ в 2014 г. до 275 млн м³ в 2022 г. В г. Севастополе объем используемой пресной воды вырос с 33.5 до 39.8 млн м³ в 2022 г., или на 19%.

В Республике Крым и Севастополе объемы использования пресной воды на хозяйственно-питьевые нужды существенно превышают объемы использования на промышленные и сельскохозяйственные нужды. Поэтому рациональное использование воды в жилищно-коммунальном секторе — важнейшее условие эф-

Таблица 1. Основные показатели работы водопроводов в Республике Крым

Показатели	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
Число водопроводов и отдельных водопроводных сетей, единиц	776	753	755	792	792	791	831	830	830
Подано воды в сеть, млн м³	172.2	177.9	194.0	213.3	216.6	208.2	207.4	190.8	198.4
Отпущено воды потребителям, млн м³	97.3	106.5	105.1	103.9	107.3	104.5	104.8	99.7	101.6
Утечка и неучтенный расход воды, млн м³	63.2	66.4	83.6	103.1	104.3	97.9	96.8	86.1	91.2
% во всей подаче воды	36.7	37.3	43.1	48.3	48.2	47.0	46.6	45.1	46.0
Протяженность водопроводных сетей, км	13449	13867	14005	13737	14053	13789	13100	12959	13230
в том числе нуждающихся в замене, доля во всей протяженности, %	54.3	56.1	57.7	57.3	56.2	56.5	59.7	58.4	56.7
Удельный вес замененных сетей к общей их протяженности, %	1.6	0.8	1.2	0.7	0.5	0.8	1.8	1.8	0.9
Утечки и неучтенный расход воды на 1 км сетей, м³	4699	4787	5969	7505	7422	7100	7390	6644	6893

Таблица 2. Основные показатели работы водопроводов в г. Севастополе

Показатели	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
Число водопроводов и отдельных водопроводных сетей, единиц	19	19	35	32	32	32	32	34	34
Подано воды в сеть, м ³	52.47	56.09	56.63	55.72	53.06	54.89	52.55	53.8	53.6
Отпущено воды потребителям, млн м ³	26.7	26.6	28.0	27.8	29.6	29.1	29.5	29.1	29.0
Утечка и неучтенный расход воды, млн м ³	25.71	29.47	28.65	27.96	23.51	23.84	23.10	24.7	24.5
% во всей подаче воды	49.0	52.5	50.6	50.2	44.3	47.1	44.0	45.8	45.8
Протяженность водопроводных сетей, км	1118	1118	1123	1150	1150	1163	1195	1209	1213
в том числе нуждающихся в замене, доля во всей протяженности, %	56.2	59.3	59.0	59.8	59.0	57.6	56.5	66.6	66.4
Удельный вес замененных сетей к общей их протяженности, %	0.4	0.1	0.1	0.5	0.8	0.9	1.3	2.6	0.65
Утечки и неучтенный расход воды на 1 км сетей, м ³	22996	26360	25514	24352	20438	22186	19326	20437	20206

фективного использования этого дефицитного ресурса.

В Крыму число водопроводов и отдельных водопроводных сетей выросло с 776 в 2014 г. до 830 в 2022 г. (табл. 1), а их установленная производственная мощность увеличилась на 22% [16].

За 2014–2022 гг. объем подачи воды в сеть вырос на 15.2%, а отпуск воды своим потребителям – только на 4.4%. Такая ситуация объясняется ростом утечек и неучтенных расходов воды. За 8 лет в водопроводной сети Крыма утечки выросли с 63.2 до 91.2 млн м³, или на 44%, а в расчете на 1 км сетей – с 4.7 до 6.9 тыс. м³ (47%). Увеличение утечек объясняется в первую очередь изношенностью водопроводных сетей из-за малых объемов работ по строительству новых сетей и реконструкции старых. Согласно “Единой схеме водоснабжения и водоотведения Республики Крым” [18] за 2018–2030 гг. ежегодный объем строительства и реконструкции уличной сети должен составлять 495 км, или 5.1% протяженности сети. Фактически в 2018–2022 гг. было заменено от 0.5 до 1.8% сети (табл. 1).

Ситуация с работой водопроводов не лучше и в Севастополе. За 2014–2022 гг. численность постоянного населения Севастополя увеличилось на 43%, в 2022 г. она превысила 550 тыс. человек. Из крупных городов России это самый быстрорастущий город. Однако работа коммунальных служб не поспевает за ростом населения. За этот период отпуск воды потребителям увели-

чился лишь на 8.6% (табл. 2). Утечки и неучтенный расход воды составляет 44–47% от объема воды, поданной в сеть, а в расчете на 1 км сетей >20 тыс. м³. Ежегодная замена водопроводных сетей колебалась от 0.1 до 1.3% требующих замены; и лишь в 2021 г. она превысила 2%) [15].

Для всех муниципальных образований характерна крайне изношенная коммунальная инфраструктура, требующая огромных затрат на восстановление. К сожалению, в настоящее время не находится достаточно финансовых средств и производственных мощностей для ремонта и нового строительства водопроводных и канализационных сетей и содержания их в надлежащем состоянии.

Важно обеспечить туристов и отдыхающих, прибывающих в Республику Крым, питьевой водой высокого качества, особенно тех, кто приезжает на санаторно-курортное лечение. По данным Министерства курортов и туризма Республики Крым, поток туристов в последние годы стремительно нарастает [19]. С 2014 по 2021 г. он вырос с 3.8 до 9.39 млн чел., или почти в 2.5 раза. В 2022 г. в связи с закрытием авиасообщения турпоток в Крым снизился до 6.56 млн чел.

Согласно социологическим исследованиям Министерства курортов и туризма Республики Крым, среднестатистический турист в последние годы проводит на полуострове 14–15 дней [17]. Тогда приведенная численность населения равна сумме численности постоянного насе-

ления и ежегодной численности туристов и отдыхающих, умноженной на коэффициент 0.04. Приведенная численность населения с учетом отдыхающих превышала среднегодовую численность постоянного населения Республики Крым в 2021 г. на 19.8%, в 2022 г. на 13.6%.

В то же время отмечается поступательное снижение объемов использования пресной воды на питьевые и хозяйственно-бытовые нужды. Так, в целом по субъекту федерации этот объем сократился за 2015–2022 гг. с 89.5 до 80.8 млн м³, или на 9.7% [7]. В результате среднесуточное водопотребление населения в Республике Крым с учетом роста количества отдыхающих за 2014–2022 гг. снизилось с 134 до 101 л (на 25%), а в Севастополе в результате резкого роста численности постоянного населения и одновременного сокращения объемов водоподачи — с 184 до 98 л (на 47%) (рис. 2).

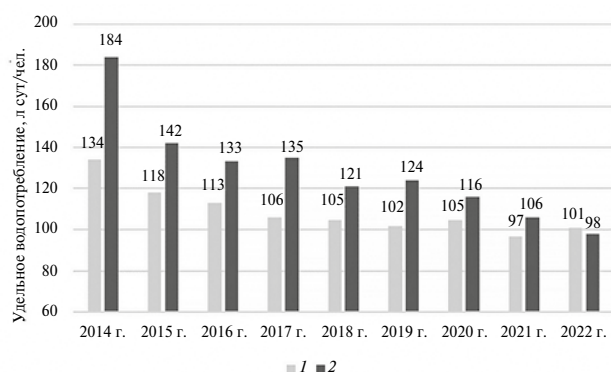


Рис. 2. Динамика удельного потребления воды на питьевые и хозяйственно-бытовые нужды в среднем за год с учетом отдыхающих, л/сут/чел.: 1 — Республика Крым; 2 — г. Севастополь.

Максимальное количество отдыхающих на Крымском п-ове отмечается в июле и августе. Местные водоканалы учитывают это обстоятельство и наращивают объем водоподачи в пиковый период. Так, на Южном берегу Крыма в третьем квартале среднесуточный отпуск воды потребителями организациями коммунального комплекса в 2.5 раза превышает аналогичный показатель первого квартала. В то же время население за счет отдыхающих увеличивается еще больше. Так, в Алуште в июле–августе 2019 г. население по сравнению со среднегодовой величиной воз-

растало в 5–6 раз. Это приводило к тому, что, несмотря многократный рост водоподачи, удельное среднесуточное водопотребление снижалось до критических значений [9].

Помимо дефицита пресной воды во многих регионах Крыма существуют проблемы с качеством воды [3]. Вода, поступающая потребителям из водохранилищ, содержит незначительное количество минеральных солей, но подвержена сезонным изменениям по органолептическим показателям, скачкам по микробиологическим показателям, вызванным жаркими сезонами и малыми объемами водохранилищ в засушливые годы. Состав вод подземных источников часто отличается повышенной минерализацией, значительным превышением норм по общей жесткости воды, содержанию хлоридов. Наиболее острые проблемы отмечены в ГО Евпатории, Саки, Красноперекоске, Красноперекоском и Первомайском районах, где отсутствуют надлежащие сооружения предварительной очистки воды.

Высокая заболеваемость некоторыми болезнями связывается с плохим качеством воды в водных объектах — источниках питьевого водоснабжения — и с высокой долей проб неудовлетворительного качества по санитарно-химическим показателям. Случаи поражения мочеполовой системы в Крыму занимают 2–3-е место среди общего количества заболеваний. Количество впервые зафиксированных случаев таких заболеваний в последние годы не снижается и составляет ежегодно 74–77 тыс. [5].

Доля населения, обеспеченного качественной питьевой водой из систем централизованного водоснабжения, в последние годы не повышается [12]. В настоящее время только ~3/4 городского населения Республики Крым и <2/3 сельского населения обеспечены качественной питьевой водой. В Севастополе обеспеченность населения качественной питьевой водой >97%, что значительно выше среднероссийского уровня (рис. 3).

Объем используемой на производственные нужды свежей воды в целом по Республике Крым был довольно устойчивым в период 2015–2022 гг. — от 63 до 88 млн м³. В шести ГО потре-

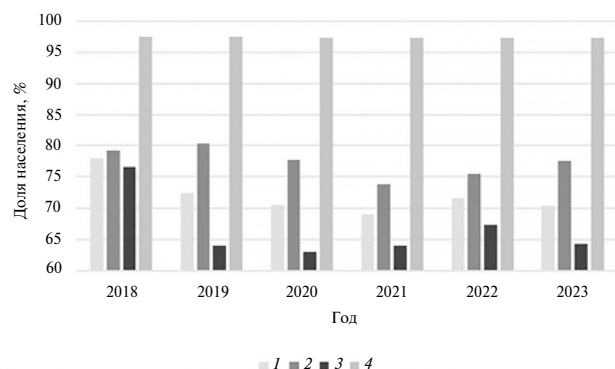


Рис. 3. Доля населения, обеспеченного качественной питьевой водой из систем централизованного водоснабжения. Республика Крым: 1 — все население, 2 — городское население, 3 — сельское население; 4 — г. Севастополь — городское население.

бляется 83% всего объема воды, используемого на производственные нужды Республики Крым (Армянск, Симферополь, Керчь, Красноперекоск, Феодосия и Ялта).

В 2022 г. оборотное и повторно-последовательное водоснабжение практиковалось в 11 муниципальных образованиях (МО) Республики Крым и Севастополе, что позволяет существенно экономить использование свежей воды на производственные нужды. Коэффициент водоборота рассчитывается как отношение объема оборотного и повторно-последовательного водоснабжения к суммарному объему водоснабжения на производственные нужды (сумма свежей и оборотной воды). В Республике Крым в последние годы он составляет 73–75%. В Севастополе после введения в эксплуатацию Балаклавской ТЭС в 2019 г. он увеличился с 1 до 95–97%.

Развитие сельского хозяйства и орошаемого земледелия Крыма в условиях дефицита водных ресурсов

Продовольственная безопасность Крыма может быть гарантирована только при орошении сельскохозяйственной земли, так как естественное увлажнение обеспечивает $\leq 30\%$ потребности растений во влаге. После 2014 г. на ее территории в результате недостатка поливной воды резко сократились посевные площади под основными сельскохозяйственными культурами, что привело к существенному сокращению производства

продовольствия.

Производство зернобобовых культур и подсолнечника на орошаемых землях (ОЗ) снизилось в 2021 г. по сравнению с 2013 г. в 20–100 раз, основных кормовых культур — в 2–3 раза, бахчевых продовольственных культур — в >4 раза. В то же время производство овощей осталось на прежнем уровне, а производство картофеля за счет роста урожайности выросло в 2 раза. Заметно выросло производство плодов семечковых культур и ягод. Почти восстановились объемы производства винограда (рис. 4).

В условиях засушливого климата развитие орошаемого земледелия крайне важно для увеличения продукции земледелия. В настоящее время в Республике Крым на ОЗ выращивают 35–60% урожая картофеля и овощей, до 20% бахчевых продовольственных, 40% кукурузы на силос и многолетних трав на сено, 20–40% кукурузы на зерно. Велика роль орошения в производстве плодово-ягодных культур: 30–45% ягод и винограда, 60–70% плодов косточковых культур, 80–90% плодов семечковых культур [8].

Средняя урожайность гороха и подсолнечника на ОЗ сельскохозяйственных организаций, крестьянских (фермерских) хозяйств и индивидуальных предпринимателей на 30–90% выше, чем на богарных, а по кукурузе на зерно — в 2–3 раза. Максимальная эффективность орошения достигается на плодово-ягодных культурах, где урожайность выше, чем на богаре, в 3–4 раза. Эти культуры выращиваются в основном при капельном

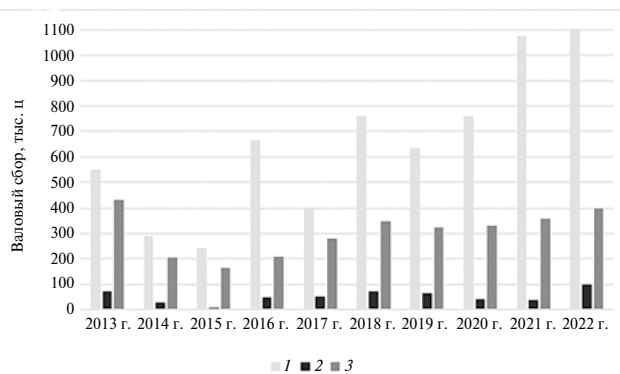


Рис. 4. Валовый сбор плодов и винограда на орошаемых землях Крыма, тыс. ц: 1 — плоды семечковые; 2 — плоды косточковые; 3 — виноград.

поливе. Значительная стоимость систем капельного орошения (КО) компенсируется высокой урожайностью сельскохозяйственных культур и быстрой окупаемостью затрат. Исследования показали, что при внутривидовом орошении и КО средняя урожайность плодов была в 1.5–2.0 раза выше, чем при поливе по бороздам [2].

После закрытия СКК площадь полива под овощами, бахчевыми и картофелем сократилась в 2 раза, под кормовыми культурами – в 7 раз, под техническим и зерновыми культурами – в 38 и 42 раза. Рис возделывать перестали.

В 2014–2021 гг. объем используемой на нужды орошения воды в Республике Крым составлял 10–25 млн м³ (против 530–570 в начале 2010-х гг.). Удельная водоподача на 1 комплексный гектар орошаемых земель снизилась в 3.5–4.5 раза в связи с резким изменением структуры поливаемых земель. В 2022 г. в результате возобновления эксплуатации СКК водоподача на орошение увеличилась до 61.2 млн м³.

Несмотря на снижение ОЗ под большинством культур, площадь полива под самыми ценными многолетними насаждениями уже в 2020 г. превысила аналогичный показатель 2013 г. и продолжала расти позже. В 2022 г. площадь многолетних насаждений была >53% ОЗ, а площадь под овощами, бахчевыми и картофелем составляла ~10% (рис. 5).

Впервые за долгие годы возобновили в небольших объемах производство риса. Дефицит подготовленных площадей с оросительной се-

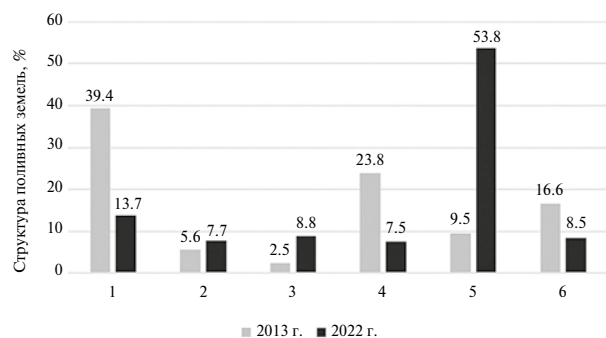


Рис. 5. Структура поливных земель в Республике Крым, %: 1 – зерновые; 2 – кормовые; 3 – овощи, бахчевые, картофель; 4 – технические; 5 – многолетние насаждения; 6 – земельные паи, аренда, фермерские хозяйства.

тью и поливной техникой не позволял увеличить площади полива под ценными кормовыми и техническими культурами. В целом по Республике Крым площадь полива с 2014 по 2022 г. увеличилась на 62% (11.1 тыс. га).

В настоящее время в Первомайском, Нижнегорском, Краснопереконском районах поливается по 2.6–3.8 тыс. га, а в Бахчисарайском и Красногвардейском районах >4 тыс. га. На эти пять районов приходится почти 18 тыс. га, или >62% совокупной площади полива.

Резкий рост дефицита воды в сельском хозяйстве привел к стремительному развитию самого экономного способа полива – КО. В большинстве МО сейчас используется КО на >1/2 ОЗ, а в Белогорском, Ленинском, Сакском, Черноморском районах и Севастополе – 95–100%.

Крым входит в тройку лидеров среди субъектов РФ по производству винограда. В 2021 г. в Республике Крым и Севастополе было выращено >1500 тыс. этой культуры, или каждый пятый килограмм винограда, производимого в России. В условиях все чаще повторяющихся засух орошение земель – главный фактор гарантированного сельскохозяйственного производства и основной ресурс повышения его продуктивности [1].

В Республике Крым доля производства винограда на ОЗ выросла с 28–30% в 2014–2015 гг. до 35–45% в последующие годы. В Севастополе из-за резкого дефицита водных ресурсов она была ≤15%, а в последние годы полив виноградников прекратился. На примере Бахчисарайского района видно, что чаще всего в производственных условиях урожайность винограда на ОЗ выше, чем на богарных, в 3–4 раза. Несмотря на дефицит водных ресурсов, производство винограда на ОЗ Республики Крым выросло за 2014–2022 гг. почти в 2 раза (на 95.4%).

В 2023 г. площадь орошения на землях государственных мелиоративных систем должна была увеличиться до 44.4 тыс. га, в том числе риса ~3 тыс. га. Ранее на обеспечение рисоводческих хозяйств шло ~60% воды из Днепра, поступавшей по каналу на полуостров. В 2025 г. правительство республики планирует организо-

вать орошение на площади в 90 тыс. га, для чего потребуется 10 млрд руб. [10].

Существенный потенциал повышения водообеспеченности мелиоративного комплекса Крыма заключается в приоритетном развитии и совершенствовании агротехнологий ОЗ, технологий полива и поливной техники; вовлечении в водооборот коллекторно-дренажных и сточных вод; снижении потерь воды на фильтрацию, утечки, испарение; внедрение современных компьютерных технологий автоматизации технологических процессов в системах водопользования агропроизводства [20].

Сброс сточных вод и содержащихся в них загрязняющих веществ. Качество воды в поверхностных водных объектах

В 2014–2022 гг. объем сброса сточной, шахтно-рудничной, карьерной и коллекторно-дренажной воды был довольно устойчивым: в 2015 и 2016 гг. он немного вырос, в дальнейшем по-

ступательно снижался (табл. 3). Согласно отчетности по форме 2–ТП (водхоз), на территории Республики Крым и Севастополя отсутствует значимый сброс шахтно-рудничной, карьерной и коллекторно-дренажной воды в поверхностные водные объекты [7], поэтому фактически в табл. 3 представлена динамика сточных вод систем водоотведения предприятий и объектов ЖКХ. В 2007–2013 гг. сброс коллекторно-дренажных вод в Крыму составлял 50–100 млн м³ [14]. В Севастополе образуется незначительное количество карьерной воды, но весь ее объем отводится в подземные водные объекты.

Значительную часть отводимых после использования вод составляют сточные ЗВ. Их доля в общем объеме отводимых сточных вод в республике сначала снизилась до 5%, но с 2017 г. стала расти и к 2022 г. достигла 90%. В Севастополе этот показатель повысился до 84%. Анализ сброса ЗВ в составе сточных вод покажет, что есть серьезные основания сомневаться в достоверности показателей по отнесению сточных

Таблица 3. Объем воды, сброшенной в природные поверхностные водные объекты Республики Крым и г. Севастополя, млн м³

Год	Объем сброшенной сточной, шахтно-рудничной, карьерной и коллекторно-дренажной воды, млн м³					Доля загрязненной воды в общем объеме сброшенной воды, %	Доля нормативно очищенной воды в объеме сточных вод, требующих очистки
	Всего	всего загрязненной	в том числе без очистки	нормативно чистой	нормативно очищенной на сооружениях очистки		
Республика Крым							
2014	120.67	51.95	7.59	18.47	50.25	43.1	49.2
2015	131.32	7.15	2.52	25.89	98.28	5.4	93.2
2016	134.70	6.97	1.68	32.62	95.11	5.2	93.2
2017	129.35	82.57	8.46	18.00	28.77	63.8	25.8
2018	124.05	106.20	7.91	11.65	6.20	85.6	5.5
2019	119.79	113.29	14.17	4.12	2.38	94.6	2.1
2020	113.05	96.87	6.65	14.52	1.66	85.7	1.7
2021	113.65	98.10	6.42	13.55	1.99	86.3	2.0
2022	109.06	98.05	6.95	5.29	5.72	89.9	5.5
г. Севастополь							
2014	42.72	18.72	3.04	20.67	3.33	43.8	15.1
2015	42.63	17.85	1.70	21.41	3.38	41.9	15.9
2016	66.91	21.63	1.60	45.24	0.03	32.3	0.1
2017	63.21	23.19	3.47	39.99	0.03	36.7	0.1
2018	62.35	25.31	3.81	37.04	0.0	40.6	0.0
2019	39.93	28.80	7.21	11.13	0.0	72.1	0.0
2020	29.37	24.66	3.68	4.57	0.13	84.0	0.5
2021	29.73	24.32	3.58	5.20	0.22	81.8	0.9
2022	28.86	24.25	3.83	4.44	0.18	84.0	0.7

вод к различным категориям загрязнения в 2015 и 2016 гг.

В подавляющем большинстве МО в настоящее время наблюдается неблагоприятное соотношение загрязненных и нормативно очищенных вод. В 2022 г. в Республике Крым до нормативов очищалось 5.72 млн м³ сточных вод (рост в последние три года), или 5.5% общего объема, требующего очистки. В Севастополе эти показатели заметно хуже — соответственно 0.18 млн м³ и 0.7%.

В связи со снижением объемов отводимых сточных вод (на 10% в Республике Крым, на 33% в Севастополе), изменением их качественного состава, ростом мощности очистных сооружений (соответственно на 9 и 10%) значительный интерес представляет анализ динамики сбросов ЗВ. По большинству ЗВ отмечается существенный рост их сброса в водные объекты в 2022 г. по сравнению с 2014 г. (табл. 4).

Так, сброс взвешенных веществ в составе сточных вод увеличился за этот короткий период в Республике Крым на 74%, а сброс БПК_{полн} и ХПК в — 2.0–2.1 раза.

При этом сброс фосфатов снизился в >2 раза. Сброс сухого остатка вырос на 30%, а сульфатов и хлоридов — снизился соответственно на 26 и 15%. Самое большое снижение сброса отмечается по нефтепродуктам и неионогенным синтетическим поверхностно-активным веществам (НСПАВ) — соответственно в три и 79 раз. Сброс железа сократился на 28%, а сброс нитритов вырос на 16%. Итак, из 15 анализируемых ЗВ величина сброса нитратов за восьмилетний период не изменилась, по шести веществам отмечается снижение сброса, в том числе по трем — существенное. Однако по восьми веществам наблюдается рост сброса загрязнений, причем по шести весьма заметный — в 1.7–2.4 раза.

В настоящее время ~6% объема сточных вод Республики Крым, содержащих ЗВ, сбрасывается непосредственно в Азовское море, 44–46% — в Черное море, 36–38% — в водные объекты бассейна р. Салгир, 12% — во все остальные поверхностные водные объекты (реки, озера, водохранилища) [7].

Рассматривая динамику качества воды рек Крыма, впадающих в Черное море, можно заключить, что за 2015–2022 гг. оно в основном изменилось в лучшую сторону. По данным Гид-

Таблица 4. Динамика сброса загрязняющих веществ в составе сточных вод в Республике Крым

Загрязняющие вещества	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2022 г. к 2014 г., %
Сухой остаток, тыс. т	74.68	—	101.08	61.39	56.42	106.1	95.93	119.7	97.37	130
Сульфаты, тыс. т	17.38	20.04	19.21	16.64	20.01	17.30	14.33	17.96	12.81	74
Хлориды, тыс. т	34.49	36.77	25.63	22.29	33.82	31.80	29.97	39.36	29.45	85
ХПК, тыс. т	2.597	2.141	2.910	3.078	3.010	2.797	4.065	6.829	5.471	211
Нитраты, т	3713	2229	4134	4457	4295	3745	3597	4627	3771	102
БПК полный, т	1727	2012	1908	2591	2626	2314	2441	3690	3372	195
Взвешенные вещества, т	1295	1559	1768	2136	2088	1909	2024	1848	2249	174
Азот аммонийный, т	365.0	457.0	510.7	775.1	806.4	4521	4828	4090	643.7	176
Фосфаты (по фосфору), т	441.3	551.6	560.6	688.3	702.3	514.9	607.9	265.7	195.4	44
Нитриты, т	96.40	95.27	106.3	102.02	82.90	159.9	89.47	86.74	112.4	117
Железо, т	12.93	16.45	14.06	20.29	17.12	16.61	15.21	12.59	9.10	72
Нефтепродукты, т*	—	17.77	14.39	20.76	19.27	18.29	12.34	5.244	6.105	34
НСПАВ, т*	—	18.41	19.92	36.62	26.26	6.677	0.450	0.266	0.232	1.3
Алюминий, т	1.501	1.039	0.981	0.676	1.189	0.840	0.747	3.574	3.607	240
Медь, кг, т	148.0	6.1	—	5.0	—	—	0.1	10.1	284.9	192

*2022 г. к 2015 г., %.

рохимического института [13], на реках Биюк-Узенбаш, Дерекойке, Демерджи качество воды, определяемое на основе удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ), изменилось с класса 2 (“слабо загрязненная”) на класс 1 (“условно чистая”); на р. Улу-Узень — с класса 3а (“загрязненная”) на класс 2. Качество воды в реках Кучук-Узенбаш, Альме и Таракташ не изменилось. В р. Ускут качество воды ухудшилось — с класса 3а до класса 3б (“очень загрязненная”).

В Приазовье улучшение качества воды с класса 3а до 2 и с класса 3б до 3а произошло на р. Салгир (створы в с. Пионерское и с. Двуречье). На р. Биюк-Карасук отмечено ухудшение качества воды с класса 2 до класса 3а в створе ниже г. Белогорска, и без изменения оно осталось в створе выше г. Белогорска. Качество воды рек Малый Салгир (створы выше и ниже Симферополя) и Салгир (ниже пгт ГРЭС) осталось класса 3а. Таким образом, на реках Черноморского побережья Крыма качество воды за этот период в основном улучшилось, а на реках Азовского побережья не изменилось.

Контроль качества морской воды проводится в местах водопользования населения. С этой

целью установлено 340 контрольных створов на пляжах Республики Крым, где проводятся мониторинговые исследования. По микробиологическим показателям в курортный сезон 2022 г. не соответствовало санитарно-эпидемиологическим требованиям 3.27% проб, по санитарно-химическим показателям — 0.04% [5].

В 2022 г. >97% ЗВ (кроме нитратов и сухого остатка), содержащихся в сточных водах Севастополя, сбрасывалось непосредственно в Черное море; основные водотоки (реки Черная, Бельбек, Кача) ими не загрязнялись. За довольно короткий период сброс ЗВ в этом субъекте федерации значительно вырос (табл. 5).

Так, сброс сухого остатка, нефтепродуктов, никеля увеличился в 15–26 раз, а сброс соединений железа, цинка, меди, марганца — в 2.5–6 раз. По четырем веществам сброс увеличился на 30–70%, а по БПК и нитратам — лишь на 10–12%. Сброс нитритов в Севастополе сократился на 40%. Сокращение сброса фосфатов и ХПК было самым значительным — соответственно в 2.6 и 5.5 раз.

Поскольку сбросы осуществляются в основном в море, качество воды рек, протекающих

Таблица 5. Динамика сброса загрязняющих веществ в составе сточных вод в г. Севастополе

Загрязняющие вещества	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2022 г. к 2014 г., %
Сухой остаток, тыс. т	0.922	0.992	14.34	13.96	13.99	13.31	13.22	14.43	15.86	1720
Сульфаты, т	1412	1564	1614	1583	1769	1658	2146	2356	1831	130
Хлориды, т	2234	3515	3459	3096	2299	2696	3573	4363	3864	173
ХПК, т	5352	5225	5527	5574	6571	5710	6546	6831	980	18
БПК полный, т	3533	3459	3534	3584	4257	4094	3946	4040	3950	112
Взвешенные вещества, т	2047	3551	4393	2552	3601	3958	4146	3497	3566	174
Азот аммонийный, т	712.6	653.5	813.7	1333	1129	1417	1110	1005	1082	152
Нитраты, т	221.3	227.2	238.8	259.5	261.7	159.0	158.9	201.9	242.4	110
Фосфаты (по фосфору), т	208.3	221.8	224.2	251.9	242.5	72.78	75.48	79.20	81.21	39
Нефтепродукты, т*	—	2.41	2.35	25.41	88.07	87.71	37.49	29.89	62.99	2612
Нитриты, т	6.700	8.615	8.419	9.415	8.673	8.136	5.612	2.686	4.057	61
Железо, т	8.863	9.371	9.830	12.39	15.62	16.31	17.64	15.04	23.77	268
Цинк, кг	224.9	288.4	99.1	1035	1131	665	1051	1756	1364	607
Медь, кг	179.3	195.7	214.8	626.4	706.7	771.8	538.4	498.7	433.8	242
Никель, кг**	—	—	—	153.8	1140	1887	2923	3413	2279	1482
Марганец, кг**	—	—	—	744.5	848.9	1827	2168	2226	2269	305

*2022 г. к 2015 г., %.

**2022 г. к 2017 г., %.

в Севастополе, за исследуемый период, по данным Гидрохимического института, улучшилось [13]. В р. Черной качество воды, определяемое на основе УКИЗВ, изменилось с класса 2 (“слабо загрязненная”) до класса 1 (“условно чистая”), а на р. Каче — с класса 3а (“загрязненная”) до класса 1. В р. Бельбек качество воды не изменилось и по-прежнему относится к классу 2 (“слабо загрязненная”).

В Севастополе контроль качества морской воды проводится на 24 створах. В 2022 г. на пляжах не отвечало требованиям санитарно-эпидемиологических норм по микробиологическим показателям 12.2% проб. По санитарно-химическим показателям неудовлетворительных проб не было [5]. Источники загрязнения морской воды — сточные воды канализационных очистных сооружений, несанкционированные выпуски отдельных мини-гостиниц, а также поверхностный сток.

Экономические механизмы регулирования водных отношений, используемые в РФ и Республике Крым, в том числе и плата за загрязнение водных объектов, слабо проработаны, не приносят должного эффекта и требуют корректировки и усовершенствования [4].

ВЫВОДЫ

Выявлено резкое изменение структуры забора пресной воды из различных источников. За 2014–2021 гг. забор воды из поверхностных источников в Республике Крым снизился в 2.2 раза, а забор воды из подземных источников увеличился в 2.8 раза.

Для всех муниципальных образований характерна крайне изношенная коммунальная инфраструктура, требующая огромных затрат на восстановление. За 2014–2022 гг. утечки и потери в водопроводной сети Крыма выросли на 44%, а в расчете на 1 км сетей — на 47%. Необходимо резко усилить мощности по строительству и реконструкции водопроводных сетей.

Среднесуточное водопотребление населения в Республике Крым с учетом отдыхающих за 2014–2022 гг. снизилось с 134 до 101 л, а в Сева-

стополе в результате резкого роста численности постоянного населения и одновременного сокращения объемов водоподачи — с 184 до 98 л.

Доля населения, обеспеченного качественной питьевой водой из систем централизованного водоснабжения, в последние годы не повышается. В настоящее время только 3/4 городского населения Республики Крым и <2/3 сельского населения обеспечены качественной питьевой водой. Количество впервые зафиксированных случаев заболеваний, связанных с водным фактором, в последние годы не снижается. Требуется строительство современных сооружений и использование новых технологий предварительной очистки природных вод.

Оборотное и повторно-последовательное водоснабжение позволяет существенно экономить использование свежей воды на производственные нужды. В Республике Крым коэффициент водооборота в последние годы составляет 73–75%. В Севастополе после введения в 2019 г. в эксплуатацию Балакловской ТЭС он увеличился с 1 до 95–97%.

После перекрытия Северо-Крымского канала площадь поливаемых земель сократилась в 7–8 раз. Резкий рост дефицита воды в сельском хозяйстве привел к стремительному росту самого экономного способа полива — капельного. Для повышения водообеспеченности мелиоративного комплекса Крыма необходимо совершенствование технологий полива и поливной техники; вовлечение в водооборот коллекторно-дренажных и сточных вод; снижение потерь воды на фильтрацию, утечки, испарение.

В условиях засушливого климата развитие орошаемого земледелия крайне важно для наращивания производства продукции земледелия. В настоящее время в Крыму на орошаемых землях выращивают 35–60% урожая картофеля и овощей, 40% кукурузы на силос, 20–40% кукурузы на зерно, 30–45% ягод и винограда, 60–70% плодов косточковых культур, 80–90% плодов семечковых культур.

Доля загрязненной воды в общем объеме сточных вод выросла к 2022 г. в Республике Крым до

90%, в Севастополе до 84%. До нормативов очищается соответственно 5.5 и 0.7% объема вод, требующих очистки. Более 50% загрязненных вод республики отводится непосредственно в Черное и Азовское моря. На реках Черноморского побережья Крыма качество воды за этот период, в основном, улучшилось, а на реках Азовского побережья не изменилось.

В 2022 г. >97% основных загрязняющих веществ, содержащихся в сточных водах Севастополя, сбрасывалось непосредственно в Черное море и главные водотоки (реки Черная, Бельбек, Кача) ими не загрязнялись. В 2022 г. на пляжах не отвечало требованиям санитарно-эпидемиологических норм по микробиологическим показателям 12.2% проб морской воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Борисенко М.Н., Березовская С.П.* Орошение виноградников Крыма — стратегически важный элемент получения винограда высокого качества // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2018. № 54 (6). С. 33—51.
2. *Боровой Е. П., Ходяков Е.А., Кременской В. И., Джанарова А.М.* Этапы развития капельного орошения в Крыму // Изв. Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2020. № 2 (58). С. 29—39.
3. *Ветрова Н.М., Борбот И.Н., Данилович И.В.* Особенности формирования экологически безопасного водоснабжения на вододефицитных территориях // Вестн. Волгоградского гос. архитектурно-строительного ун-та. Сер. Стр-во и архитектура. 2023. Вып. 3—4 (92). С. 148—156.
4. *Волкова Н.Е., Иванютин Н.М., Тарасенко В.С., Паштецкий В.С., Подовалова С.В.* Рациональное водопользование в Республике Крым: значение, ограничения, подходы к достижению // Вод. ресурсы. 2022. Т. 49. № 4. С. 363—371.
5. Государственный доклад “О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Республике Крым и городе федерального значения Севастополе в 2020 году”. [Электронный ресурс]. <https://82.rospotrebnadzor.ru/s/82/files/documents/Gosdoklad/149867.pdf> (дата обращения: 21.02.2024)
6. *Данилов-Данильян В.И., Козлова М.А., Полянин В.О., Чеснокова И.В.* Научное обеспечение водной безопасности Крыма: проблемы и решения // Вод. ресурсы. 2022. Т. 49. № 4. С. 363—371.
7. Данные наблюдений за объемом вод при водопотреблении и водоотведении на всех водных объектах (по форме 2—ТП (водхоз)) // Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. [Электронный ресурс]. <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=513> (дата обращения: 21.02.2024)
8. *Демин А.П.* Развитие орошения и производство продовольствия в Республике Крым (2014—2020 гг.) // Орошаемое земледелие. 2022. № 3. С. 30—34.
9. *Демин А.П., Зайцева А.В., Харламов М.А.* Водопотребление и водоотведение в муниципальных образованиях Республики Крым и г. Севастополь: современное состояние и проблемы // Вод. ресурсы. 2022. Т. 49. № 4. С. 395—406.
10. Для восстановления мелиоративной сети на 90 тыс. гектарах поливных земель республики потребуется более 10 миллиардов рублей / *Алиме Зарединова*. [Электронный ресурс]. https://msh.rk.gov.ru/article/show/2022_08_18_18_05_dlia_vosstanovleniia_meliiorativnoi_seti_na_90_tys_gektarakh_polivnykh_zemel_respubliki_potrebuetsia_bolee_10_milliardov_rublei_alime (дата обращения: 26.02.2024)
11. Доклад о состоянии и охране окружающей среды на территории Республики Крым в 2021 году. Симферополь: Министерство экологии и природных ресурсов Республики Крым, 2022. 400 с.
12. Доля населения Российской Федерации, обеспеченного качественной питьевой водой из систем централизованного водоснабжения. [Электронный ресурс]. <https://fedstat.ru/> (дата обращения: 26.02.2024)
13. Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник. 2015—2022 гг. [Электронный ресурс]. <https://gidrohim.com/node/44> (дата обращения: 26.02.2024)
14. *Ляшевский В.И., Тищенко А.П., Волкова Н.Е., Иванютин Н.М.* Водообеспечение сельскохозяйственной отрасли Крыма: текущая ситуация и перспективы // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2016. № 4 (64). С. 120—125.
15. О работе водопровода (отдельной водопроводной сети) в г. Севастополе [Электронный ресурс]. <https://82.rosstat.gov.ru> (дата обращения: 21.02.2024)
16. О работе водопровода (отдельной водопроводной сети) в Республике Крым [Электронный

- ресурс]. <https://82.rosstat.gov.ru> (дата обращения: 21.02.2024)
17. О развитии санаторной и туристической отрасли Республики Крым [Электронный ресурс]. <https://mtur.rk.gov.ru/structure/390f90d8-c460-46d6-90d4-981752dcf46a> (дата обращения: 21.02.2024)
 18. Постановление Совета министров Республики Крым от 26 декабря 2017 года № 714 “Об утверждении единой схемы водоснабжения и водоотведения Республики Крым”. [Электронный ресурс]. <https://rk.gov.ru/documents/d2040381-6ab0-497a-81f9-338efbaeef38> (дата обращения: 21.02.2024)
 19. Статистические данные о количестве туристов, посетивших Республику Крым. [Электронный ресурс]. <https://mtur.rk.gov.ru/structure/390f90d8-c460-46d6-90d4-981752dcf46a> (дата обращения: 21.02.2024)
 20. Юрченко И.Ф. Роль водосбережения в орошаемом земледелии республики Крым // Изв. Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 1 (69). С. 482–491.

TRANSFORMATION OF WATER CONSUMPTION AND WATER DISPOSAL IN THE REPUBLIC OF CRIMEA AND SEVASTOPOL UNDER WATER RESOURCE SHORTAGE

A. P. Demin*, A. V. Zaitseva, I. A. Vishnevskaya

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

*e-mail: deminap@mail.ru

The aim of the article is analytical assessment of transformation of water management and reclamative complex of Crimea under water resource shortage. The study was conducted by using system, and information and analytical approaches with the use of methods of logical and comparative analysis, qualitative and quantitative analysis of statistical data. Dramatic change in the structure of fresh water withdrawal is revealed. The data on the growth of water losses as a result of increasing deterioration of water supply systems and small volumes of its rehabilitation is presented. The dynamics of reduction of specific water consumption for drinking and domestic purposes, insufficient supply of population with drinking water of high quality is shown. The influence of recycled water supply on saving in fresh water use for production purposes is considered. Dramatic decrease of the area of irrigated land, change in the structure of irrigated land use, rapid development of drip irrigation, and the role of irrigation in the production of the most important agricultural products are shown. It is revealed that the share of polluted wastewater is increasing, and the share of normatively treated water is decreasing. In the Republic of Crimea there is both a decrease and an increase in the discharge of certain pollutants. Water quality of most rivers of Crimea does not deteriorate.

Keywords: Republic of Crimea, Sevastopol, water resources deficit, domestic and drinking water supply, specific water consumption, recycled water supply, irrigation, polluted and normatively treated water, discharge of pollutants, water quality

УДК 504.062

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕКИ САЛГИР НА ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА СИМФЕРОПОЛЯ¹

© 2024 г. В. С. Тарасенко, Н. Е. Волкова*, В. С. Паштецкий, А. А. Манжос

Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма, Симферополь, 295043 Россия

**e-mail: Volkova.natalya12@yandex.com*

Поступила в редакцию 19.03.2024 г.

После доработки 19.03.2024 г.

Принята к публикации 01.04.2024 г.

Проведен анализ данных мониторинговых наблюдений за качественным составом вод р. Салгир на территории г. Симферополя и с. Укромного за 2017 и 2020 гг. Установлено ухудшение экологического состояния водотока, обусловленное воздействием городской среды как в маловодный, так и близкий к среднему по водности годы. Выделены участки русла Салгира, на которых фиксируется резкое ухудшение качественного состава вод. Обоснован перечень мероприятий, направленных на снижение негативного воздействия г. Симферополя на экологическое состояние обследованного водотока.

Ключевые слова: городская среда, антропогенная нагрузка, речной сток, коэффициент комплексности, удельный комбинаторный индекс загрязненности воды, водоохранные мероприятия.

DOI: 10.31857/S0321059624060147 EDN: VOAYGR

ВВЕДЕНИЕ

С древних времен реки играют важную роль в развитии человеческой цивилизации. Первые города-государства появились на берегах таких крупных рек, как Нил, Евфрат, Тигр, Инд, Хуанхэ, что в первую очередь было обосновано пониманием важности наличия водоисточника для обеспечения питьевых и хозяйственно-бытовых нужд населения, развития орошения, выступавшего гарантом получения стабильных урожаев. Данная традиция дошла и до наших дней. Большинство современных крупных населенных пунктов возводилось вблизи водотоков. К примеру, в Республике Крым 11 городов из 16 расположено в долинах рек и ручьев. Данный подход к выбору места расположения населенных пунктов на практике привел к негативному воздействию на экологическое состояние самих водотоков. Согласно результатам исследований ряда ученых (Е.А. Солдатовой, О.Г. Савичева, Р.Г. Джамалова, Н.И. Коронкевича, К.С. Мельник, Т.А. Берниковой, Т.С. Папиной, А.В. Кряхтунова, А.Г. Георгиади и др.), города оказывают влияние на качественные и количественные

характеристики речного стока [1–5, 7, 12–20]. В большинстве случаев при прохождении водотока по территории населенного пункта фиксируется повышение содержания в воде нитратов, фосфатов, нефтепродуктов, тяжелых металлов, вредоносных микроорганизмов.

Довольно интересное исследование в данном направлении провели А.Г. Георгиади, Е.О. Шаропова, А.О. Даниленко. Проанализировав данные гидрохимических мониторинговых наблюдений по основным рекам Центральной России за 2005–2019 гг., исследователи не только отметили ухудшение качества вод, но и ранжировали города по их влиянию на экологическое состояние водотоков. Ученые установили, что наиболее неблагоприятное воздействие оказывают Москва, Тула, Воскресенск и Донской [17]. Проведение подобных исследований важно не только для понимания фактической ситуации, но и для разработки мероприятий по оздоровлению городской среды и уменьшению антропогенной нагрузки на водные объекты.

Исходя из вышеизложенного сформулирована цель данной работы — дать комплексную оценку экологического состояния р. Салгир на территории Симферополя и на ее основе разра-

¹ Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект 22-27-20062, <https://rscf.ru/project/22-27-20062/>).

ботать предложения по снижению негативного воздействия данного населенного пункта на качественный состав воды данного водотока.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования выбрана самая длинная река Крымского п-ова. Салгир относится к группе средних рек. Его протяженность, согласно [6], составляет 204 км, из них 19.8 км приходится на территорию столицы Крымского региона — г. Симферополь. Этот водоток интенсивно используется в качестве источника воды для питьевых, коммунально-бытовых и производственных нужд. От Салгира наполняются водой такие крупные водохозяйственные объекты, как Симферопольское водохранилище и Салгирская оросительная система.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование включало в себя решение следующих задач:

- анализ данных, полученных в ходе мониторинговых наблюдений Крымского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (КУГМС) за гидрологическими характеристиками в пункте наблюдения, расположенном вблизи с. Пионерского, и Центре лабораторного анализа и технических измерений (ЦЛАТИ) за качественным составом воды р. Салгир в период с 2015 по 2021 г., во время которого усилилась антропогенная нагрузка на местные водоисточники в связи с прекращением поставок днепровской воды по системе Северо-Крымского канала (СКК);
- расчеты коэффициента комплексности и удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ);
- проведение в 2022 г. полевых обследований, включая отбор проб воды, водотоков Салгир и Петровская балка на территории г. Симферополя;
- разработку предложений по снижению негативного воздействия г. Симферополя на экологическое состояние р. Салгир.

Расчет коэффициента комплексности и УКИЗВ проводился по шести точкам наблюдений ЦЛАТИ, расположенным на территории г. Симферополя (т. 1 — т. 4) и в районе с. Укром-

ного (т. 5 и т. 6 рядом с местом сброса сточных вод с канализационных очистных сооружений г. Симферополя) в соответствии с РД 52.24.643—2002 [11]. Схема их расположения представлена на рис. 1. При расчете УКИЗВ учитывалось 18 показателей: O_2 , БПК₅, ХПК, нефтепродукты, фенолы, аммоний солевой, нитриты, нитраты, фосфаты, хлориды, сульфаты, железо, марганец, никель, медь, кадмий, свинец и цинк.

В ходе полевых обследований акваторий и прибрежных зон водотоков в границах г. Симферополя отборы проб воды проводились по четырём точкам наблюдений (т. 2, т. 3 на Салгире и т. Б.и. и т. Б.у. соответственно на истоке и в устье водотока Петровская балка), при выборе мест расположения которых учитывалась схема размещения мониторинговой сети ЦЛАТИ. Отслеживались следующие показатели: O_2 , БПК₅, нитраты, фосфаты, хлориды, сульфаты, железо, медь, кадмий, свинец, цинк, ОКБ, E.coli. Растворенный кислород определялся в полевых условиях с помощью портативного прибора “Актаком АТТ-3010”, солевой состав и тяжелые металлы — в сертифицированной лаборатории НИИСХ Крыма, биологическое потребление кислорода на 5 сут, наличие общих колиформных бактерий и кишечной палочки — в Центре гигиены и эпидемиологии в Республике Крым и городе федерального значения Севастополе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Период с 2015 по 2021 г. характеризуется значительными колебаниями объемов формирующегося речного стока на входе в г. Симферополь (рис. 2).

На рис. 2 максимальный среднегодовой расход воды по р. Салгир ($1.94 \text{ м}^3/\text{с}$) зафиксирован в 2017 г., а минимальный ($0.09 \text{ м}^3/\text{с}$) — в 2020 г. При этом суммарный объем попусков из Симферопольского водохранилища в 2017 г. составил $\sim 12 \text{ млн м}^3$ воды, а в 2020 г. был равен нулю. Рассмотрим, как повлияла водность года на изменение качественного состава воды по течению Салгира на территории г. Симферополя и в районе с. Укромного на примере этих двух лет. В табл. 1 представлена сводная информация по показателям, величины которых не соответ-

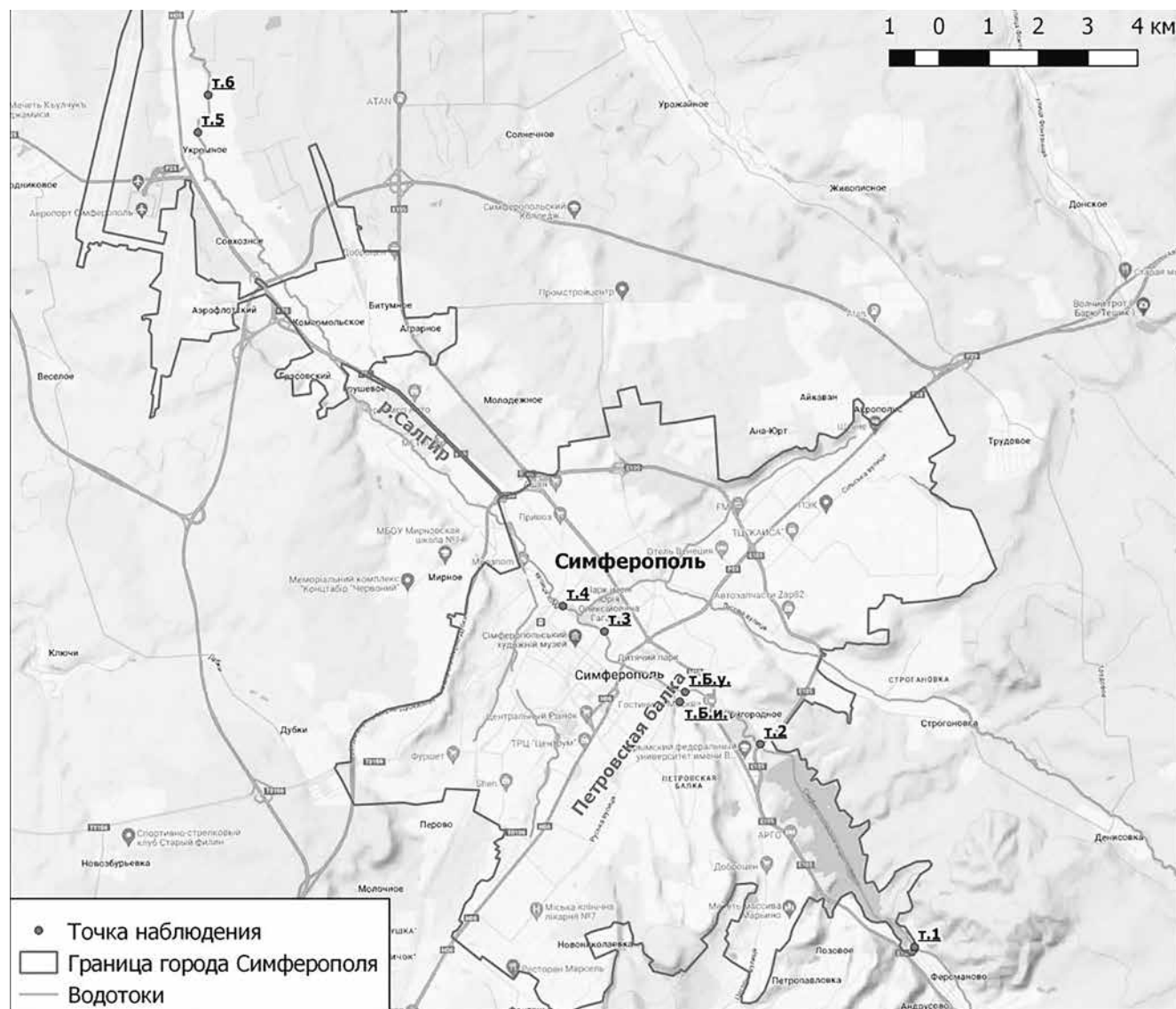


Рис. 1. Картограмма территории расположения точек наблюдения за качественным составом р. Салгир.

Таблица 1. Сведенные данные по показателям, превышающим ПДК загрязняющих веществ в воде р. Салгир на территории г. Симферополя в 2017 и 2020 гг.

Пункт наблюдения	2017 г.		2020 г.	
	показатель	максимальный уровень превышения ПДК	показатель	максимальный уровень превышения ПДК
т. 1	Железо	1.6	Аммоний солевой	1.7
	марганец	1.5	нитриты	6.1
	свинец	1.2	фосфаты	2.6
			кадмий	2.7
			марганец	2.3
			свинец	2.7
			цинк	1.2
т. 2	Нитраты	1.1	Кадмий	4.0
	цинк	1.5	марганец	4.7
			цинк	3.9
т. 4	БПК ₅	1.7	БПК ₅	2.7
	нефтепродукты	1.6	аммоний солевой	9.8
	аммоний солевой	2.4	нитриты	4.8
	нитриты	4.8	нитраты	1.2
	нитраты	1.1	фосфаты	4.2
	фосфаты	1.8	сульфаты	1.9
	железо	3.1	кадмий	6.2
	кадмий	1.6	марганец	7.1
	марганец	3.0	медь	11.0
	медь	27.0	свинец	3.0
	цинк	1.1	цинк	4.4
т. 5	БПК ₅	4.0	БПК ₅	1.9
	ХПК	1.3	нитриты	2.5
	нефтепродукты	1.6	нитраты	1.1
	аммоний солевой	1.7	фосфаты	1.7
	нитриты	4.1	сульфаты	1.4
	нитраты	1.1	железо	1.8
	фосфаты	1.2	кадмий	4.4
	сульфаты	1.3	марганец	2.2
	железо	1.8	свинец	4.2
	марганец	1.6	цинк	6.4
т. 6	O ₂	1.7	БПК ₅	3.1
	БПК ₅	4.8	аммоний солевой	6.2
	ХПК	1.9	нитриты	41.2
	нефтепродукты	2.9	нитраты	1.9
	аммоний солевой	3.3	фосфаты	48.5
	нитриты	9.3	сульфаты	1.4
	нитраты	1.1	кадмий	3.8
	фосфаты	50.5	марганец	2.3
	сульфаты	1.5	свинец	4.2
	железо	2.2	цинк	5.4
	цинк	28.0		

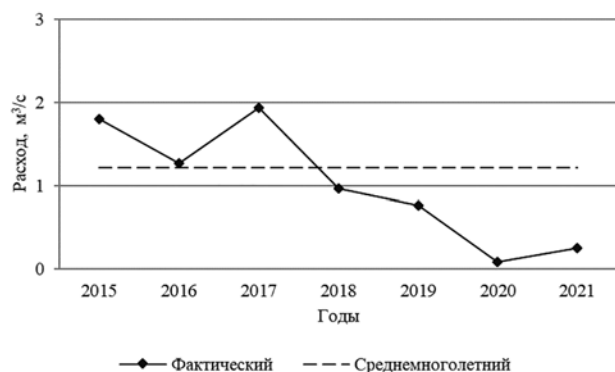


Рис. 2. Среднегодовые значения расхода речного стока по пункту наблюдения, расположенному вблизи с. Пионерского, за 2015–2021 гг.

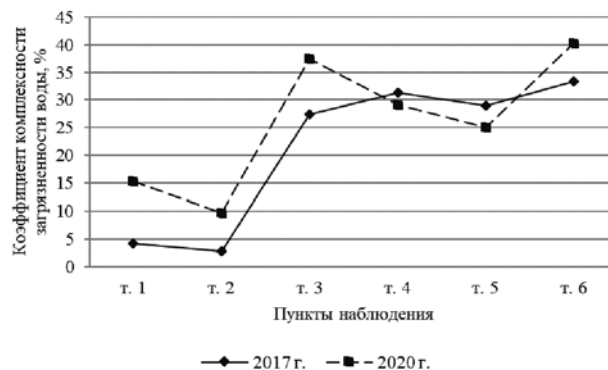


Рис. 3. Динамика коэффициента комплексности загрязненности воды по течению р. Салгир на территории г. Симферополя в 2017 и 2020 гг.

ствоваали ПДК загрязняющих веществ в воде, принятым в соответствии с наиболее жесткими требованиями, изложенными в нормативной документации РФ, а именно в приказе Министерства сельского хозяйства РФ от 13.12.2016 [10] и СанПиНе 1.2.3685-21 [9].

По всем точкам наблюдения в 2017 и 2020 гг. было зафиксировано превышение ПДК минимум по двум показателям. В воде р. Салгир на территории г. Симферополя и с. Укромного фиксировалось очень высокое содержание аммония солевого, нитритов, фосфатов, тяжелых металлов. Кратность превышения ПДК загрязняющих веществ в воде колебалась от 1.1 до 50.5 раз.

Величина коэффициента комплексности загрязненности вод Салгира по точкам наблюдений в 2017 г. колебалась от 2.8 до 33.3%, а в 2020 г. — от 9.7 до 40.3% (рис. 3), т. е. негативное влияние городской среды на экологическое состояние водотока проявлялось как в маловодный, так и близкий к среднему по водности годы.

Так как по ряду точек наблюдений коэффициент комплексности загрязненности воды Салгира $>10\%$, был проведен расчет УКИЗВ и определен критический показатель загрязненности (КПЗ) (табл. 2).

Как показывают результаты проведенных расчетов, состав вод Салгира на территории г. Симферополя и с. Укромного претерпевает существенные изменения. Класс качества повышается минимум на две позиции. Основные скачки при этом отмечаются на участке между т. 2 и т. 3, а также т. 5 и т. 6. Основная причина зафиксированного ухудшения качества воды на территории с. Укромного — сбросы сточных вод с канализационных очистных сооружений г. Симферополя, что, в свою очередь, свидетельствует о необходимости проведения на них капитальных ремонтных работ или полной реконструкции. В отношении участка реки между т. 2 и т. 3 с высокой долей вероятности ухудшение качества вод обусловлено сочетанием следующих причин. Высокое содержание

Таблица 2. Результаты комплексной оценки качества водных ресурсов р. Салгир

Пункт наблюдения	2017 г.			2020 г.		
	УКИЗВ	КПЗ	класс, разряд	УКИЗВ	КПЗ	класс, разряд
т. 1	0.68	0	1	2.39	0	3а
т. 2	0.39	0	1	1.30	0	2
т. 3	3.90	1	4а	5.07	5	4г
т. 4	3.79	1	4а	4.60	3	4б
т. 5	2.57	0	3а	3.44	1	3б
т. 6	4.29	3	4б	4.79	2	4а

Таблица 3. Состояние сетей водоотведения г. Симферополя

Район города	Протяженность сетей водоотведения, км	
	всего	в ветхом и аварийном состоянии
Центральный	202.24	161.82
Железнодорожный	120.04	96.54
Киевский	148.05	85.95
Итого	470.33	344.31

в воде тяжелых металлов и нефтепродуктов обусловлено их смывом с селитебных территорий. Симферополь в недостаточной мере обеспечен системами ливневой канализации. Ее фактическая протяженность составляет 37 км, а согласно Постановлению администрации г. Симферополя Республики Крым от 20.12.2016 [8], необходимо, исходя из размеров города, особенностей его месторасположения и рельефа, – 237 км. Кроме того, собираемые ливневые воды не проходят очистку, поэтому частично решается только проблема подтопления низинных участков, а не загрязнения водных объектов смывами с селитебных территорий. Еще одна вероятная причина ухудшения качества вод – недостаточная канализованность Симферополя. К услугам централизованного водоотведения подключено ~70% населения. Наиболее неблагоприятная обстановка по канализованности складывается на территориях водосборных бассейнов водотоков

Петровская Балка, Абдалки, Славянки. К примеру, по Петровской Балке не канализована практически вся территория. В совокупности с изношенностью сетей водоотведения (табл. 3) это влечет за собой загрязнение речного стока сточными водами.

Для подтверждения данной гипотезы в 2022 г. были взяты пробы воды из Салгира и его притока Петровской балки, которая впадает между т. 2 и т. 3. Результаты исследования сведены в табл. 4.

По водотоку Петровская балка в 2022 г. было зафиксировано очень высокое содержание в воде нитратов (>200 мг/дм³) и присутствие кишечной палочки, что свидетельствует о загрязнении данного водного объекта неочищенными коммунально-бытовыми стоками. Это, в свою очередь, негативно отразилось и на качестве вод Салгира ниже впадения данного притока.

Кроме того, в ходе полевого обследования акваторий и прибрежных зон водотоков Салгир и Петровская балка на территории г. Симферополя был зафиксирован ряд нарушений водного законодательства РФ: замусоривание и устройство свалок, застройка неканализованными домовладениями, отсутствие свободного доступа к водотоку и др. Все это в совокупности не только способствует ухудшению качества вод, но и снижает рекреационную привлекательность водных объектов.

Таблица 4. Результаты анализа проб воды, отобранной из р. Салгир и водотока Петровская балка в июле 2022 г.

Показатель	Единицы измерения	Содержание			
		т. 2	т. Б.и.	т. Б.у.	т. 3
O ₂	мг/дм³	7.4	11.0	9.8	6.2
БПК ₅	мгO ₂ /дм³	1.5	2.2	1.9	1.5
ОКБ	КОЕ/100 см³	0.0	7.5	33.0	44.0
E.coli	КОЕ/100 см³	0.0	7.5	33.0	44.0
Нитраты	мг/дм³	7.1	221.9	212.2	45.2
Хлориды	мг/дм³	21.3	110.1	95.9	56.8
Сульфаты	мг/дм³	41.7	172.2	144.0	72.6
Фосфаты	мг/дм³	<0.05	0.4	1.1	0.2
Медь	мг/дм³	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Свинец	мг/дм³	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004
Цинк	мг/дм³	0.003	0.009	0.009	0.004
Кадмий	мг/дм³	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Железо	мг/дм³	0.069	0.070	0.026	0.050

ВЫВОДЫ

По результатам исследования в условиях усиления дефицита водных ресурсов на территории Республики Крым, обусловленного перекрытием внешнего водоисточника, негативное влияние г. Симферополя на качество вод р. Салгир проявилось как в маловодный, так и близкий к среднему по водности годы. Основные причины этого следующие: низкий уровень очистки коммунально-бытовых стоков, обусловленный техническим состоянием канализационных очистных сооружений; недостаточный охват территории населенного пункта системами централизованного водоотведения и высокий уровень их изношенности; смывы с селитебной территории.

Для устранения зафиксированной неблагоприятной экологической обстановки в перечень первоочередных мероприятий, направленных на снижение негативного воздействия г. Симферополя на экологическое состояние р. Салгир, целесообразно включить следующие:

- расчистку водоохранной зоны водотока Петровская балка от скопления мусора;
- реконструкцию и расширение систем централизованного водоотведения;
- оснащение территории населенного пункта дополнительными системами сбора, отведения и очистки ливневого стока;
- проведение капитального ремонта или при необходимости полное переоснащение и модернизация городских канализационных очистных сооружений Симферополя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бугранова Е.С., Буйняченко П.П., Берникова Т.А., Уманский С.А. Оценка экологического состояния реки Гурьевки на основе гидрохимических данных и показателей фитопланктона // Изв. КГТУ. 2019. № 55. С. 59–73.
2. Волкова Н.Е., Иванютин Н.М. Методологические основы оценки уровня экологической безопасности функционирования речных водохозяйственных экосистем на территории городов // Экология и пром-сть России. 2023. Т. 27. № 1. С. 46–52. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-1-46-52
3. Волкова Н.Е., Иванютин Н.М., Подовалова С.В. Оценка гидроэкологического состояния водных объектов бассейна реки Малый Салгир // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5, География. 2021. № 3. С. 27–36.
4. Джамалов Р.Г. Мироненко А.А., Мягкова К.Г., Решетняк О.С., Сафронова Т.И. Пространственно-временной анализ гидрохимического состава и загрязнения вод в бассейне Северной Двины // Вод. ресурсы. 2019. Т. 46. № 2. С. 149–160. DOI: 10.31857/S0321-0596462149-160
5. Коронкевич Н.И., Мельник К.С. Трансформация стока под влиянием ландшафтных изменений в бассейне реки Москвы и на территории города Москвы // Вод. ресурсы. 2015. Т. 42. № 2. С. 133–143. DOI: 10.7868/S0321059615020066
6. Лисовский А.А., Новик В.А., Тимченко З.В., Губская У.А. Поверхностные водные объекты Крыма. Управление и использование водных ресурсов: справочник. Симферополь: Учпедгиз, 2011. 242 с.
7. Носкова Т.В., Подчуфарова Д.П., Лысенко М.С., Овчаренко Е.А., Папина Т.С., Ловцкая О.В., Марусин К.В., Дьяченко А.В. Экологический мониторинг состояния реки Барнаулки по химическим показателям // Изв. Алтайского отделения РГО. 2019. № 4 (55). С. 130–136. DOI: 10.24411/2410-1192-2019-15515
8. Постановление администрации г. Симферополя Республики Крым от 20.12.2016 № 3141 “Об утверждении муниципальной программы “Реконструкция и развитие системы водоснабжения и водоотведения муниципального образования городской округ Симферополь Республики Крым на 2017–2020 годы”. Симферополь: администрация г. Симферополя, 2016.
9. Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28.01.2021 № 2 “Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”. № 62296. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2021.
10. Приказ Минсельхоза Российской Федерации от 13.12.2016 № 552 “Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения”. М.: Минсельхоз, 2016.
11. РД 52.24.643-2002 Метод комплексной оценки загрязненности поверхностных вод по гидрохими-

- ческим показателям. Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2002. 50 с.
12. Солдатова Е.А., Савичев О.Г., Чжоу Д., Иванов И.С., Ли Ц., Дон И., Сунь Ч. Эколого-геохимическое состояние поверхностных и подземных вод и оценка антропогенного влияния на территорию водосбора реки Ганыцзян // Вод. ресурсы. 2022. Т. 49. № 3. С. 341–350. DOI: 10.31857/S0321059622030142
 13. Усманова Л.И. Характеристика химического состава речных вод на территории и в окрестностях города Читы // Успехи современного естествознания. 2018. № 7. С. 200–208.
 14. Устойчивый Крым. Водные ресурсы / Под ред. В.С. Тарасенко. Симферополь: Таврида, 2003. 413 с.
 15. Abdelhafiz M.A., Elnazer A.A., Seleem E.M., Mostafa A., Al-Gamal A. G., Salman S.A., Feng X. Chemical and bacterial quality monitoring of the Nile river water and associated health risks in Qena-Sohag sector, Egypt // Environ. Geochem. Health. 2021. V. 43. Iss. 10. P. 4089–4104. DOI: 10.1007/s10653-021-00893-3
 16. Darko G., Obiri-Yeboah S., Takyi S.A., Amponsah O., Borquaye L.S., Amponsah L.O., Fosu-Mensah B.Y. Urbanizing with or without nature: pollution effects of human activities on water quality of major rivers that drain the Kumasi Metropolis of Ghana // Environ. Monitoring Assessment. 2022. V. 194. Iss. 1. № 38. DOI: 10.1007/s10661-021-09686-8
 17. Georgiadi A.G., Sharapova E.O., Danilenko A.O. Urban impact on water quality in the rivers of Central Russia // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021. V. 834. № 012030. DOI: 10.1088/1755-1315/834/1/012030
 18. Glińska-Lewczuk K., Gołaś I., Koc J., Gotkowska-Płachta A., Harnisz M., Rochwerger A. The impact of urban areas on the water quality gradient along a lowland river // Environ. Monitoring Assessment. 2016. V. 188. № 624. DOI: 10.1007/s10661-016-5638-z
 19. Kryakhtunov A.V. Dynamics of Changes in the Concentration of Oil Products in the Tura River within the Residential Area of the Large Oil Capital of Russia // J. Ecol. Engineering. 2021. № 22. P. 223–229.
 20. Sabanaev R.N., Nikitin O.V., Latypova V.Z., Minakova E.A., Stepanova N.Yu. Quantitative assessment of biogenic elements and suspended matter load to inner-city river: The role of point sources and diffuse runoff // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 1889. № 032031. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/3/032031

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE SALGIR RIVER ECOLOGICAL STATE IN THE TERRITORY OF SIMFEROPOL CITY

V. S. Tarasenko, N. E. Volkova*, V. S. Pashtetsky, A. A. Manzhos

FSBSI "Research Institute of Agriculture of Crimea", Simferopol, 295043 Russia

**e-mail: Volkova.natalya12@yandex.com*

Analysis of monitoring data on the qualitative composition of the Salgir River water in the city of Simferopol and the village of Ukromnoye for 2017 and 2020 was carried out. Deterioration in the ecological state of the watercourse was established, caused by the urban environment impact both in low-water years and in years close to average in terms of water content. The sections of the Salgir riverbed where sharp deterioration in the water quality is recorded are identified. List of measures aimed at reducing the negative impact of Simferopol on the ecological state of the surveyed watercourse is substantiated.

Keywords: urban environment, anthropogenic load, river runoff, complexity coefficient, specific combinatorial index of water pollution, water protection measures