

УДК 556.5:556.3:551.44

## ОЦЕНКА СОСТАВЛЯЮЩИХ РЕЧНОГО СТОКА ГОРНОГО КРЫМА. 2. СТОК КАРСТОВЫХ ВОДОНОСНЫХ СИСТЕМ<sup>1</sup>

© 2024 г. Т. С. Губарева<sup>a,\*</sup>, Г. Н. Амеличев<sup>a,b</sup>, С. В. Токарев<sup>a,b</sup>, Б. А. Вахрушев<sup>a,b</sup>,  
Б. И. Гарцман<sup>a,c</sup>, В. Г. Науменко<sup>b</sup>, Е. Г. Амеличев<sup>a,b</sup>, И. Б. Вахрушев<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

<sup>b</sup>Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, 295007 Россия

<sup>c</sup>Институт 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  $\delta\text{H}^2$  и  $\delta\text{O}^{18}$  наряду с другими геохимическими трассерами активно используются в исследованиях взаимо-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект 23-27-00236).

действия всех видов диффузного и концентрированного стока внутри КВС.

Примерами изучения подземного стока в закарстованных 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 классификация 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; инфлюационное – проникновение в породу концентрированного стока из русел постоянных и временных водотоков через поноры и макротрещины; конденсационное – конденсация влаги из атмосферного воздуха в трещинно-каналовых 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 каналовый (“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 геохимических 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  $GK_j$ ;

$\lambda_j$  – 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, ориентирующая площадь его составляет 11 км<sup>2</sup>. Источник приурочен к зоне дробления тектонического нарушения, питание происходит за счет инфильтрации атмосферных вод через почву и эпикарст, а также путем инфильтрации 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 км<sup>2</sup>. 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

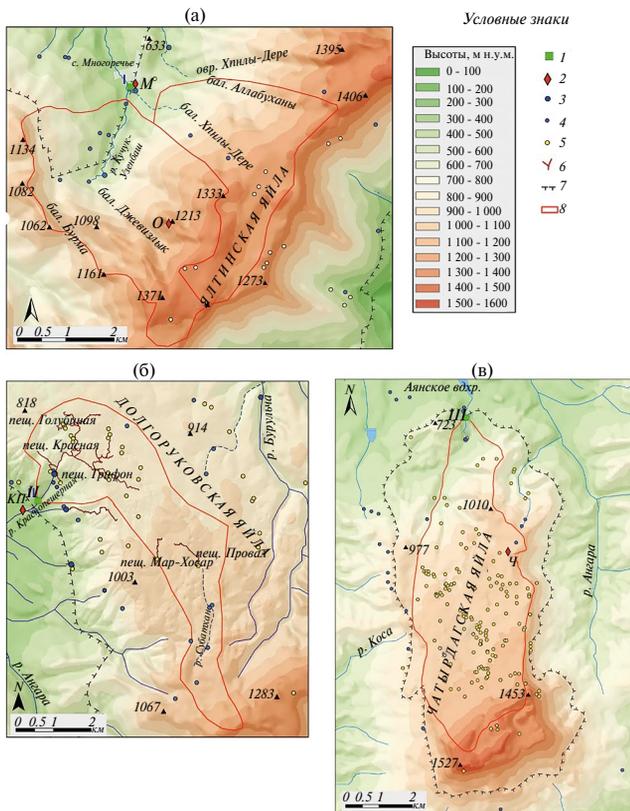
и на расстоянии до 1 км к северу происходит поглощение речных вод, которые подземным путем направляются в сторону Красной пещеры [10].

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 км<sup>2</sup>. Далее объект обозначается как бассейн КВС Аян.

В геологическом отношении массив имеет цокольное строение. Его водоносная толща, сложенная верхнеюрскими известняками, приподнята 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  $Q$  (м<sup>3</sup>/с) и результаты анализа проб воды по следующим показателям: водородный показатель рН, удельная электропроводность  $\chi$  (мкСм/см), концентрации ионов (мг/л): Na<sup>+</sup>,



**Рис. 1.** Картограммы бассейнов КВС: а – Карстовый, б – Красная пещера, в – Аян. 1 – гидрологические створы (I – Карстовый приток – с. Многогоречье, II – р. Кизилкобинка – контрольный створ; III – р. Аян – бетонный мостик); 2 – метеостанции (М – Многогоречье, О – Ольмесхыр, КП – Краснопещерная, 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 водопоявления 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 конденсационных 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  $\text{NO}_3^-$  (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 (рН 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 (рН 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 (рН 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  $\leq 3$  сут, – слабощелочные (рН 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 (рН 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 (рН 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 (рН 7.5), относительно высоким содержанием  $\text{NO}_3^-$  (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:  $\text{ГК}_j$  – главные компоненты разложений;  $\lambda_j$ , % – объясненные дисперсии по каждой  $\text{ГК}_j$

Бассейн	$\text{ГК}_j$	$\lambda_j$	$\Sigma \lambda_j$	Коэффициенты перехода трассеров (P-матрица)			
				$\chi$	$\text{Na}^+$	$\text{SO}_4^{2-}$	Si
КВС Карстовый	$\text{ГК}_1$	67	67	-0.529	0.270	0.802	-0.076
	$\text{ГК}_2$	18	85	-0.517	0.405	-0.528	-0.539
	$\text{ГК}_3$	8.5	94	-0.551	-0.024	-0.281	0.785
	$\text{ГК}_4$	6.5	100	-0.388	-0.874	0.011	-0.295
				$\chi$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	–
КВС Красная пещера	$\text{ГК}_1$	57	57	0.337	0.843	0.420	
	$\text{ГК}_2$	36	93	0.725	0.052	-0.686	
	$\text{ГК}_3$	7	100	-0.600	0.536	-0.594	
				$\chi$	$\text{NO}_3^-$	Si	–
КВС Аян	$\text{ГК}_1$	61	61	-0.482	-0.833	0.273	
	$\text{ГК}_2$	26	87	-0.650	0.131	-0.749	
	$\text{ГК}_3$	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  $\lambda_2$  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  $\lambda_2$  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-

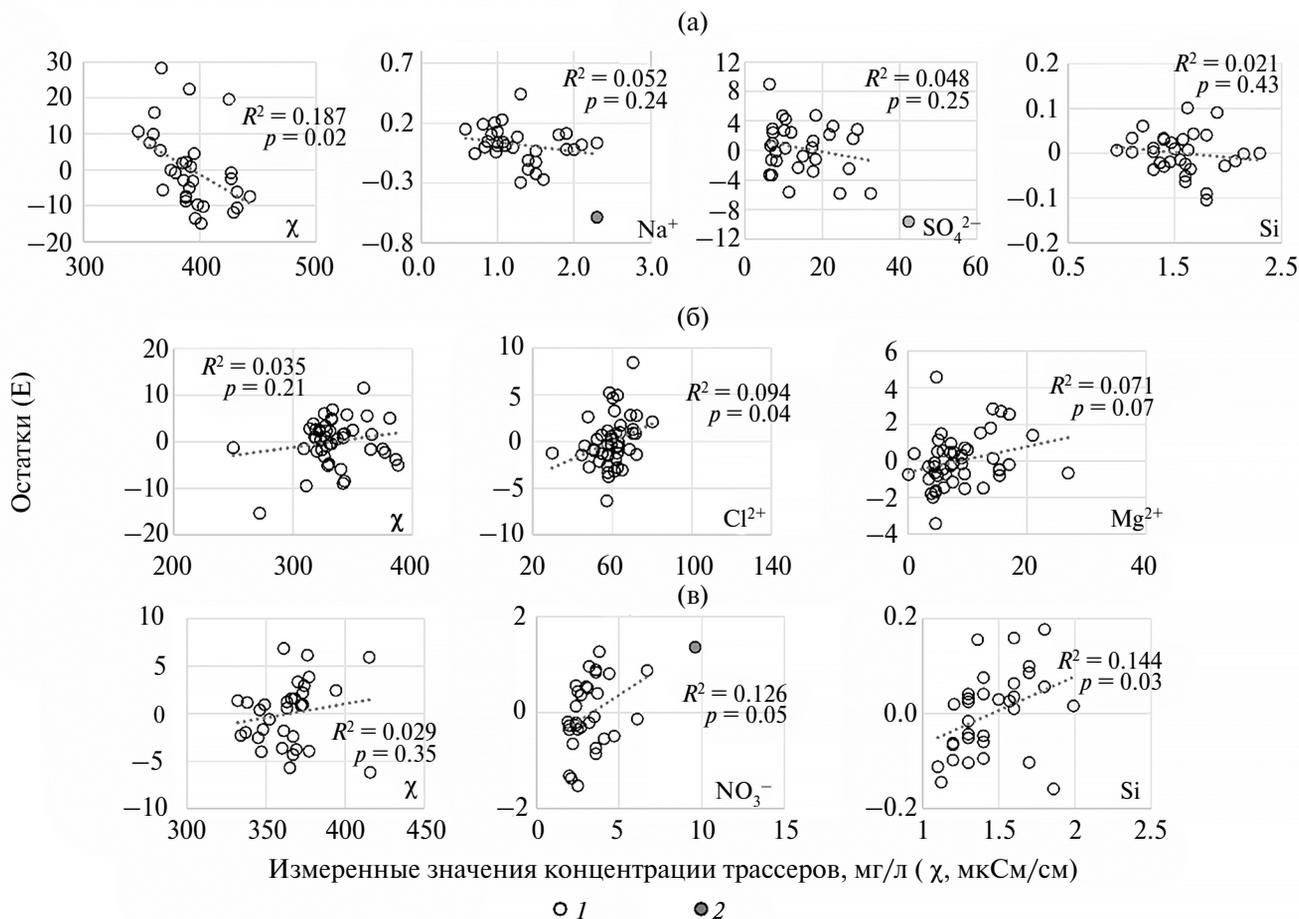
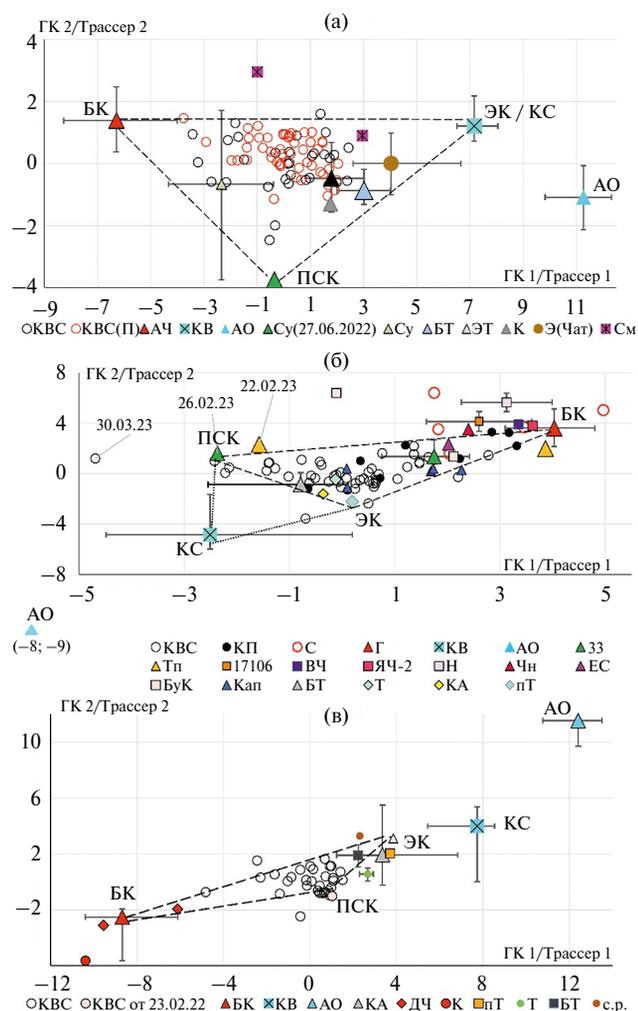


Рис. 2. Графики связи “остатки  $E$  – измеренные значения концентрации трассеров” в бассейнах: а – КВС Карстовый, б – КВС Красная пещера, в – КВС Аян. 1 – речные пробы, 2 – “отклоняющиеся значения”,  $p$  – вероятность отсутствия корреляционных связей на графиках.



**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 водопровольных: 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 удастся 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  $\text{CO}_2$  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, Ярма-Чокрак-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  $\leq 100$  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 м<sup>3</sup>/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 ( $\chi$ , мкСм/см)	Бассейн КВС												
	Карстовый					Красная пещера				Аян			
	$\Sigma i^*$	$\chi$	$\text{Na}^+$	$\text{SO}_4^{2-}$	Si	$\Sigma i$	$\chi$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\Sigma i$	$\chi$	$\text{NO}_3^-$	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

\*  $\Sigma i$  – 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

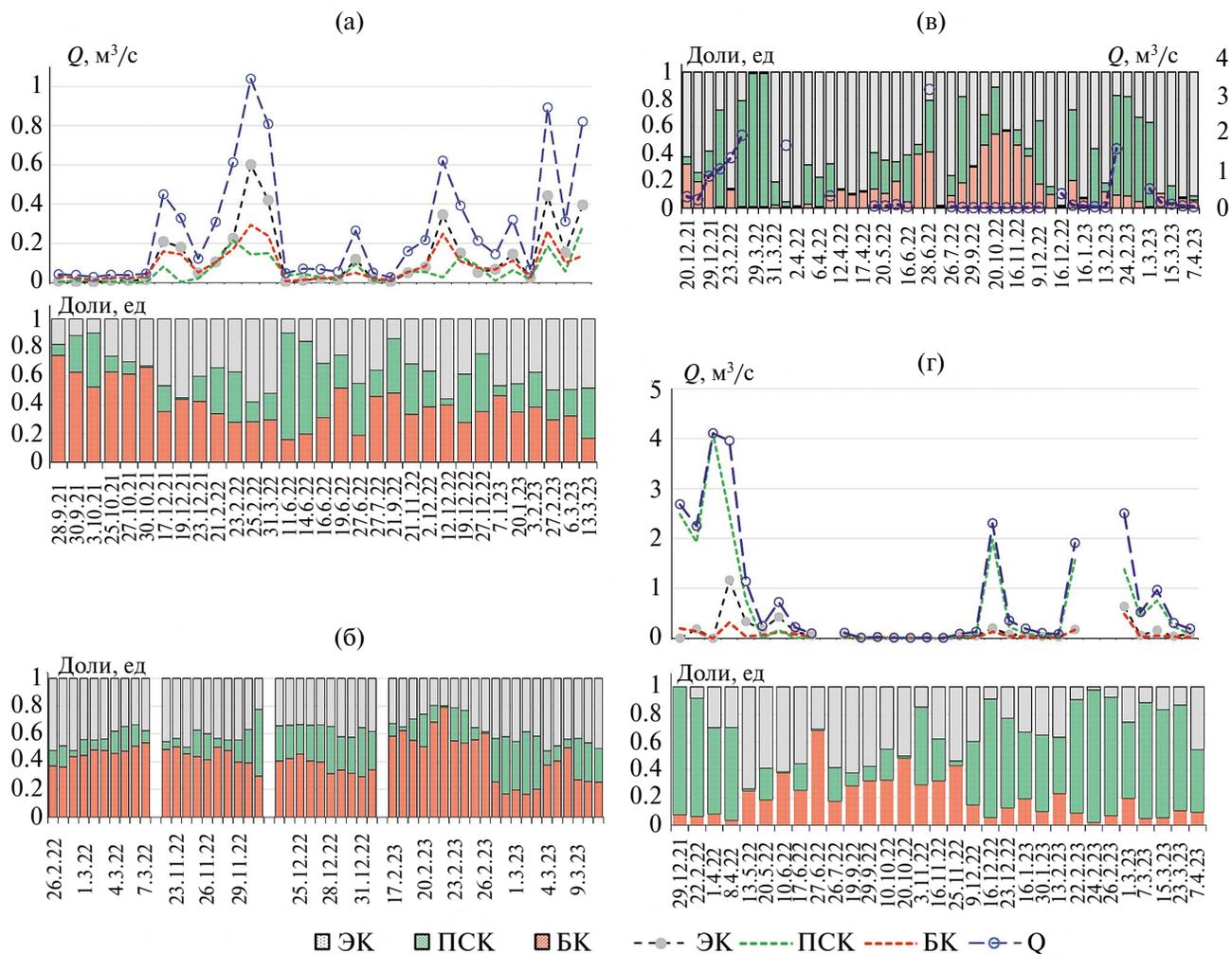


Рис. 4. Разделение стока КВС по источникам питания на даты съемки. Бассейны КВС: а – Карстовый, б – Карстовый (проверочная выборка), в – Красная пещера, г – Аян. Расшифровка источников питания приведена в тексте.

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.

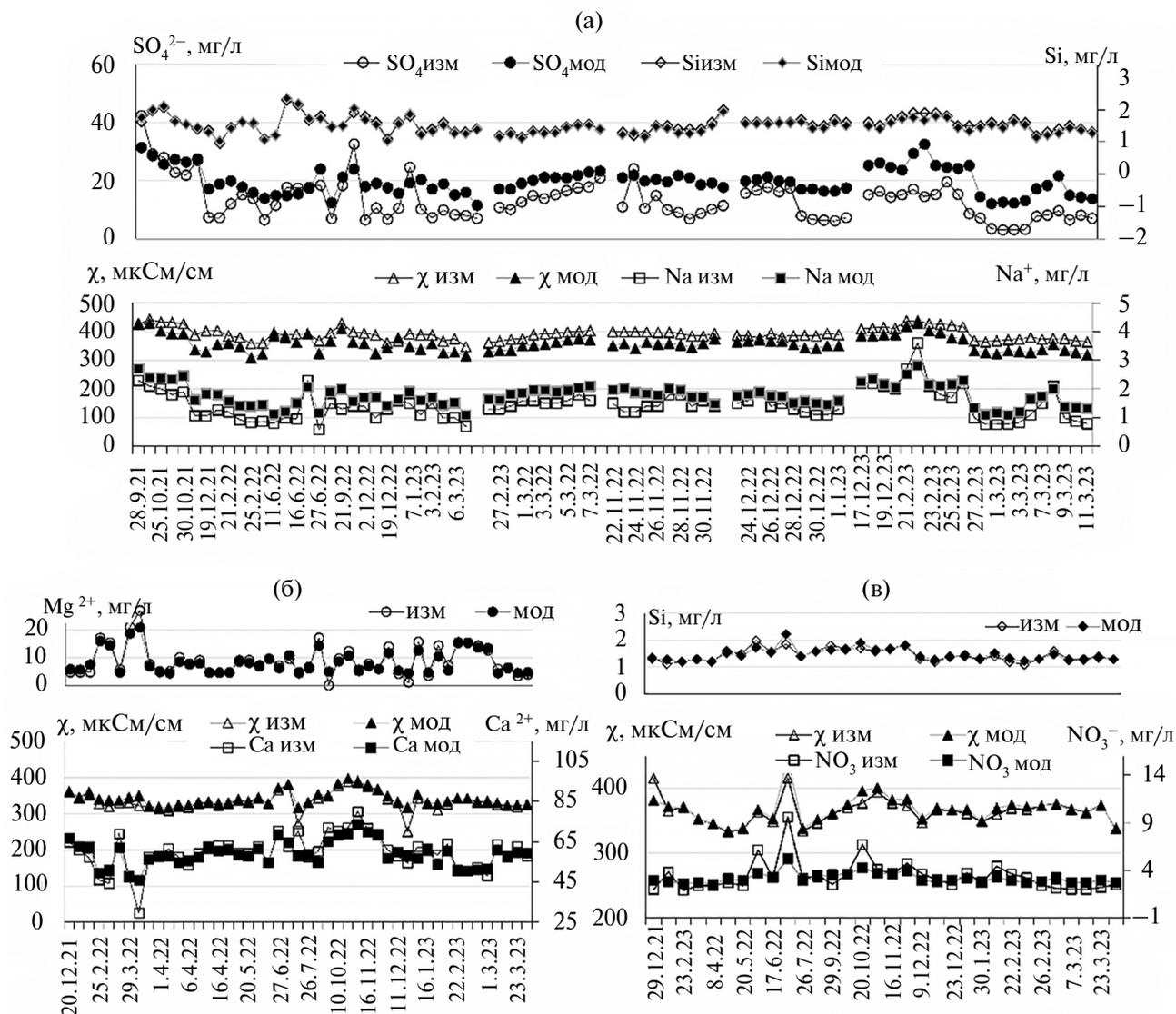


Рис. 5. Измеренные и модельные концентрации трассеров в моделях смешения бассейнов КВС: а – Карстовый: калибровочная выборка – 28.08.2021–6.03.2023, проверочная выборка 27.02.2022–11.03.2023; б – Красная пещера; в – Аян.

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.

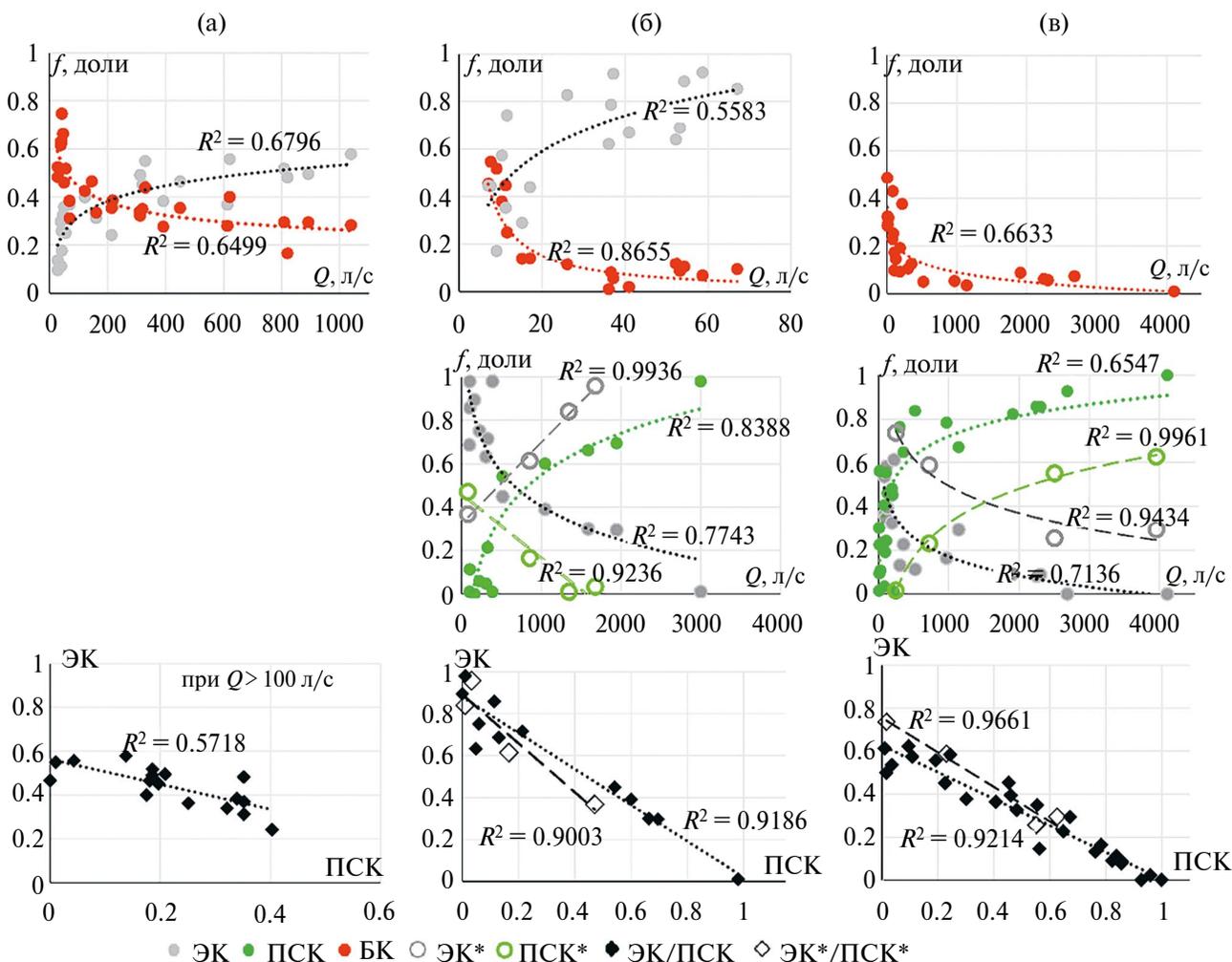
В бассейнах КВС Красная пещера и Аян источник питания ПСК представлен смесью тало-дождевых вод, подверженных поверхностной циркуляции, а впоследствии загруженной в карстовый массив в ходе инфлюации и очаговой инфильтрации. Эта составляющая стока может быть соотнесена с инфлюационным типом питания [7]. 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 м³/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  $Q < 4000$  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, происходящие 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.: Гидрометеиздат, 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., Гарцман 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., Гарцман Б.И., Токарев С.В., Вахрушев Б.А., Науменко 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 Виноградовские 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<sup>a, \*</sup>, G. N. Amelichev<sup>a, b</sup>, S. V. Tokarev<sup>a, b</sup>, B. A. Vakhrushev<sup>a, b</sup>, B. I. Gartsman<sup>a, c</sup>, V. G. Naumenko<sup>b</sup>, Ev. G. Amelichev<sup>a, b</sup>, I. B. Vakhrushev<sup>a, b</sup>**

<sup>a</sup>*Institute of Water Problems, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119333 Russia*

<sup>b</sup>*Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, 295007 Russia*

<sup>c</sup>*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 massifs 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