

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)

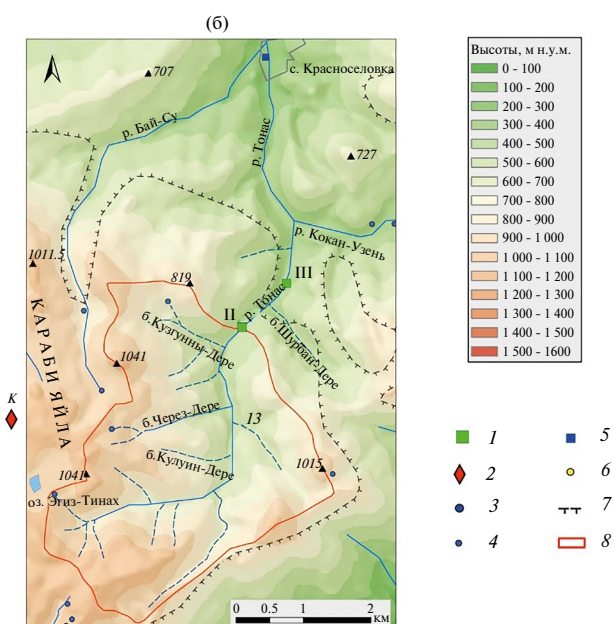
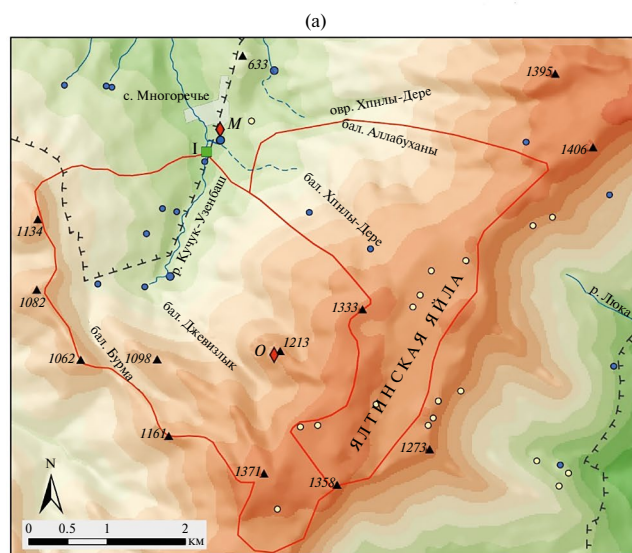


Рис. 1. Картограммы водосборов: а – р. Кучук-Узенбаш, б – р. Тонас. I – гидрологические створы (I – р. Кучук-Узенбаш – с. Многогоречье, II – р. Тонас – выше руч. Птичьего, III – р. Тонас – створ Тонасу-5); 2 – метеостанции (М – Многогоречье, О – Ольмескыр, К – Караби); источники: 3 – крупные, 4 – мелкие, 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 (Ольмескыр) 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):

$$\begin{aligned} \text{ГК}_1 &= p_{1,1}X_1 + p_{1,2}X_2 + \dots + p_{1,j}X_j = \mathbf{Xp}_1, \\ \text{ГК}_2 &= p_{2,1}X_1 + p_{2,2}X_2 + \dots + p_{2,j}X_j = \mathbf{Xp}_2, \quad (5) \\ &\vdots \\ \text{ГК}_j &= p_{j,1}X_1 + p_{j,2}X_2 + \dots + p_{j,j}X_j = \mathbf{Xp}_j \end{aligned}$$

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:

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

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

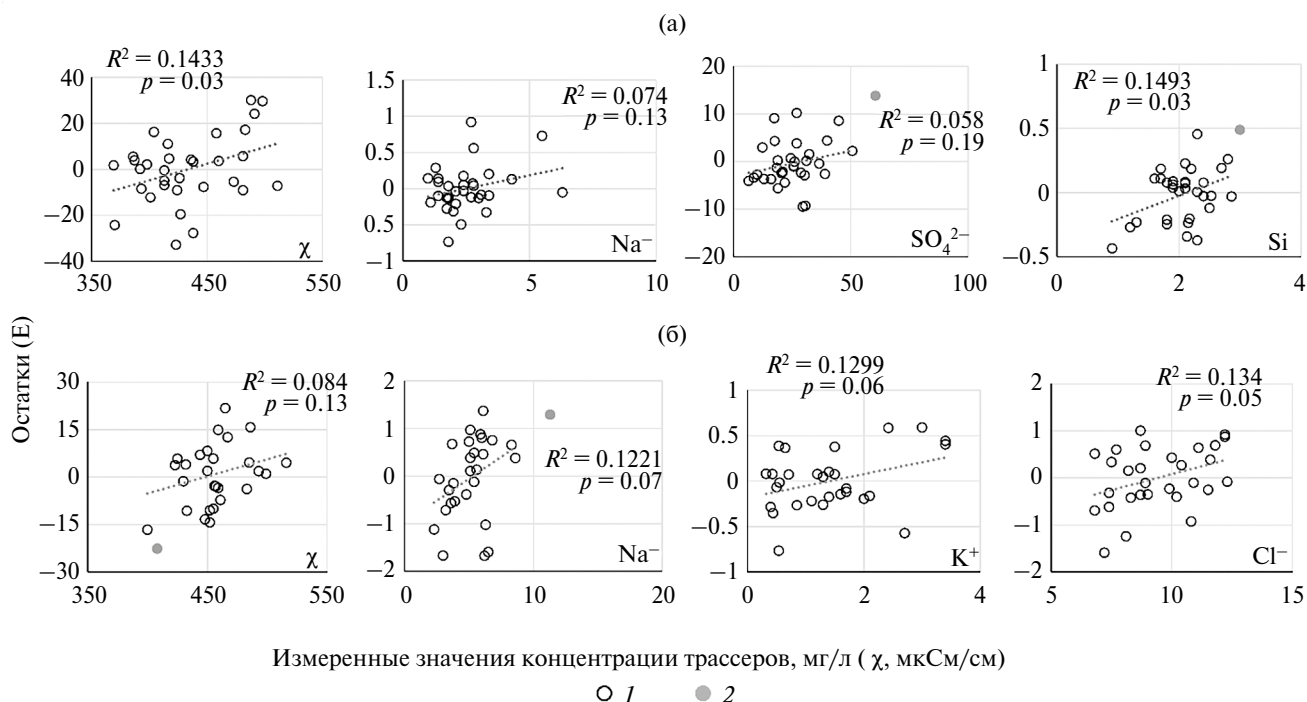


Рис. 2. Графики связи “остатки (E) — измеренные значения” на уровне 2D: а — р. Кучук-Узенбаш — с. Многогоречье, б — р. Тонас — Птичий. 1 — речные пробы, 2 — “отклоняющиеся значения”, p — вероятность отсутствия корреляционных связей на графиках.

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,

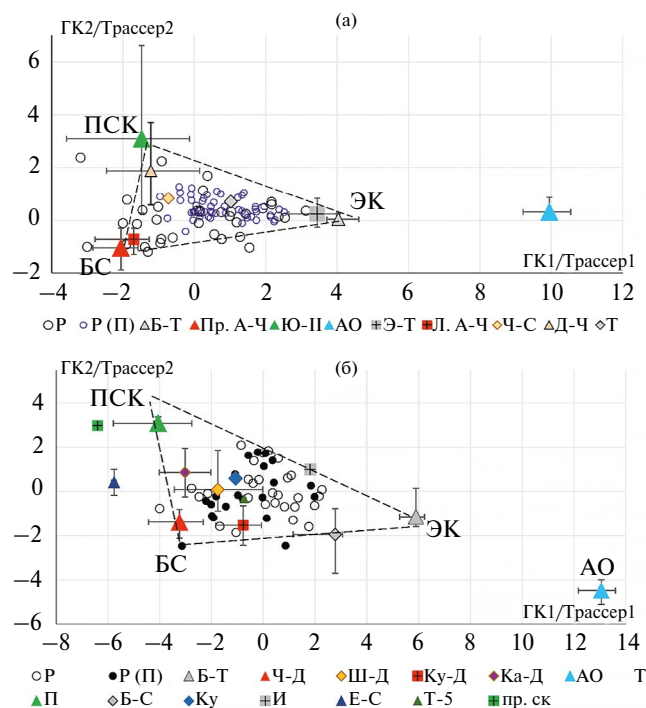


Рис. 3. Диаграммы смешения вод в U -пространстве: а – р. Кучук-Узенбаш, б – р. Тонас – выше руч. Птичьего. Источники питания: БС – базисный сток, ПСК – почвенно-склоновые воды, ЭК – эпикарстовый сток, АО – атмосферные осадки. Пробы: Р – речные, Р (П) – речные проверочной выборки, Р (Т-5) – речные из 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 крайним 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. Многоречье, 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.

ретаю 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.

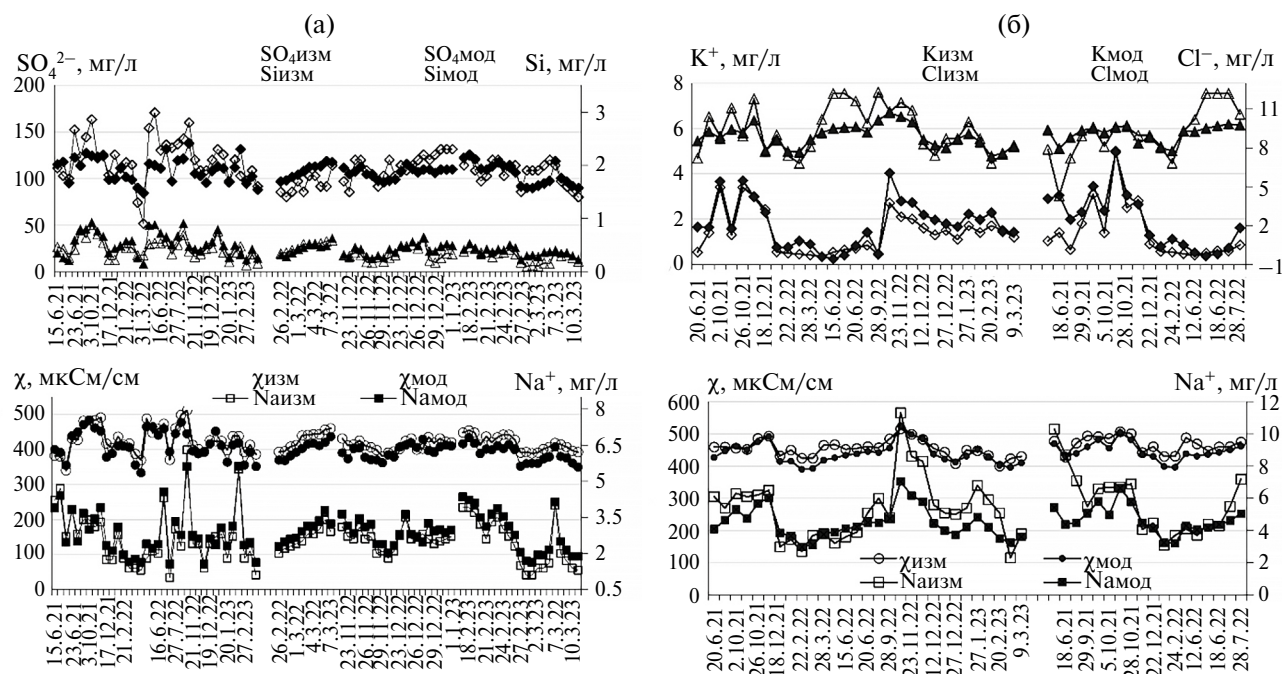


Рис. 5. Измеренные и модельные концентрации трассеров, используемые в моделях смешения. а – р. Кучук-Узенбаш: калибровочная выборка с 15.06.2021 по 27.02.2023, проверочная выборка с 26.02.2022 по 10.03.2023; б – р. Тонас: створ выше устья руч. Птичьего с 20.06.2021 по 09.03.2023, створ Тонасу-5 – с 16.06.2021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

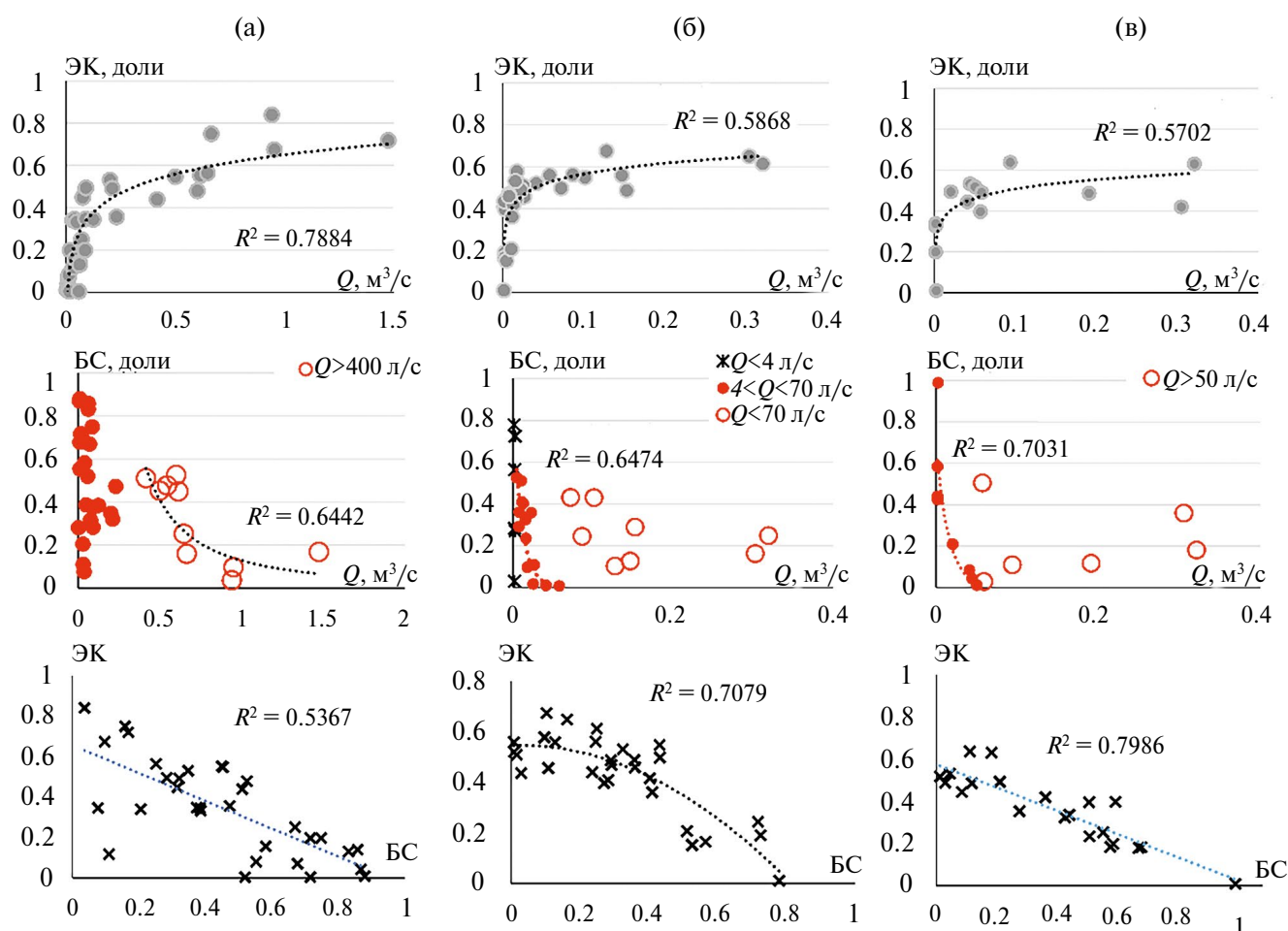


Рис. 6. Зависимости долей эпикарстового (ЭК), базисного (БС) видов стока от расхода воды (Q) и их соотношения (ЭК/БС) в замыкающих створах: а – р. Кучук-Узенбаш, б – р. Тонас – выше руч. Птичьего, в – р. Тонас – Тонасу-5.

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 обвальнo-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