

УДК 556.3; 550.46; 551.50

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

© 2024 г. Е. П. Каюкова*

Санкт-Петербургский государственный университет,

Санкт-Петербург, 199134 Россия

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

Поступила в редакцию 31.03.2024 г.

После доработки 19.05.2024 г.

Принята к публикации 20.05.2024 г.

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

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

DOI: 10.31857/S0321059624060114 EDN: VOIUWO

ВВЕДЕНИЕ

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

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

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

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

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

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

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

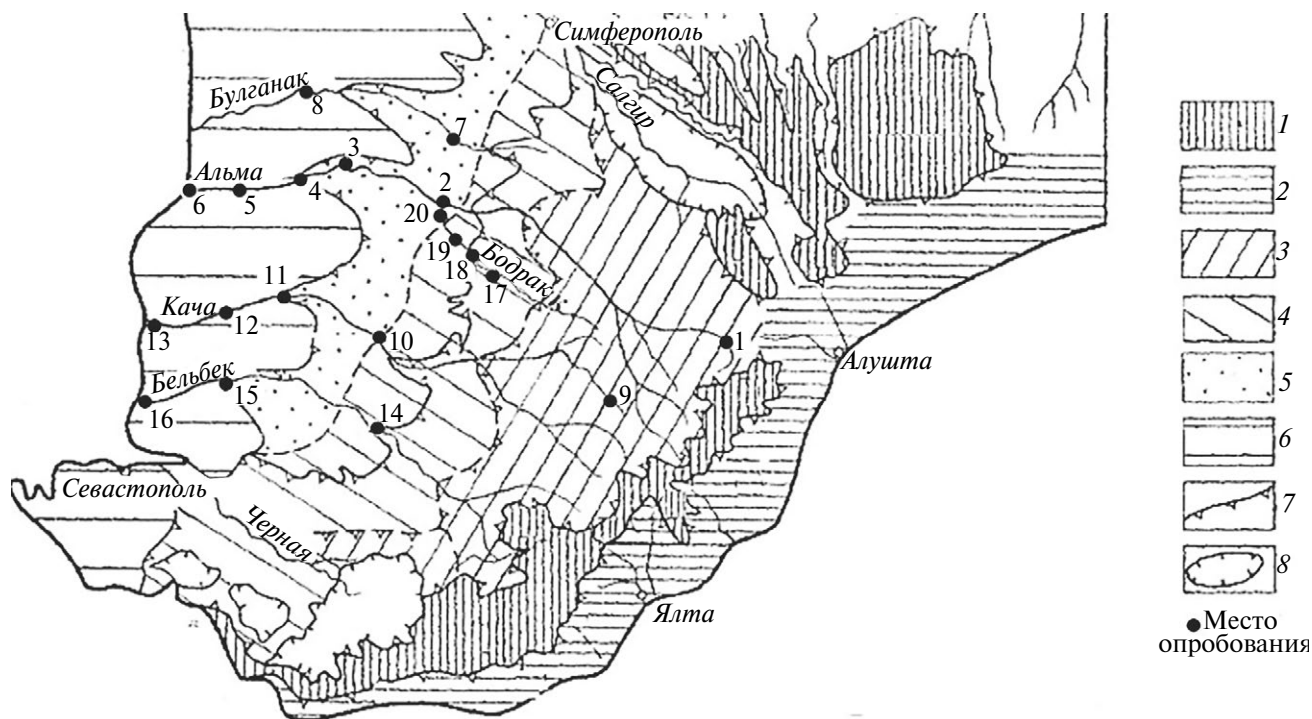


Рис. 1. Картограмма геоморфологического районирования [19]. 1 – Водораздельные плато Главной гряды; 2 – Южный склон Главной гряды (ЮБК); 3 – Южное эрозионно-денудационное межгрядовое понижение и северный склон Главной гряды Крымских гор; 4 – Внутренняя (Вторая) гряда гор; 5 – Северное эрозионно-аккумулятивное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

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

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

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

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

Геолого-гидрогеологические условия

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

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

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

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

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

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

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

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

На рис. 2 представлена гидрогеологическая карта Горного Крыма.

Климат

Климат полуострова формируется под влиянием акваторий Черного и Азовского морей,



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

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

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

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

Реки северо-западного склона Крымских гор

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

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

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

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

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

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



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

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

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

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

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

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

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

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

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

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*По данным метеостанции п. Почтового.

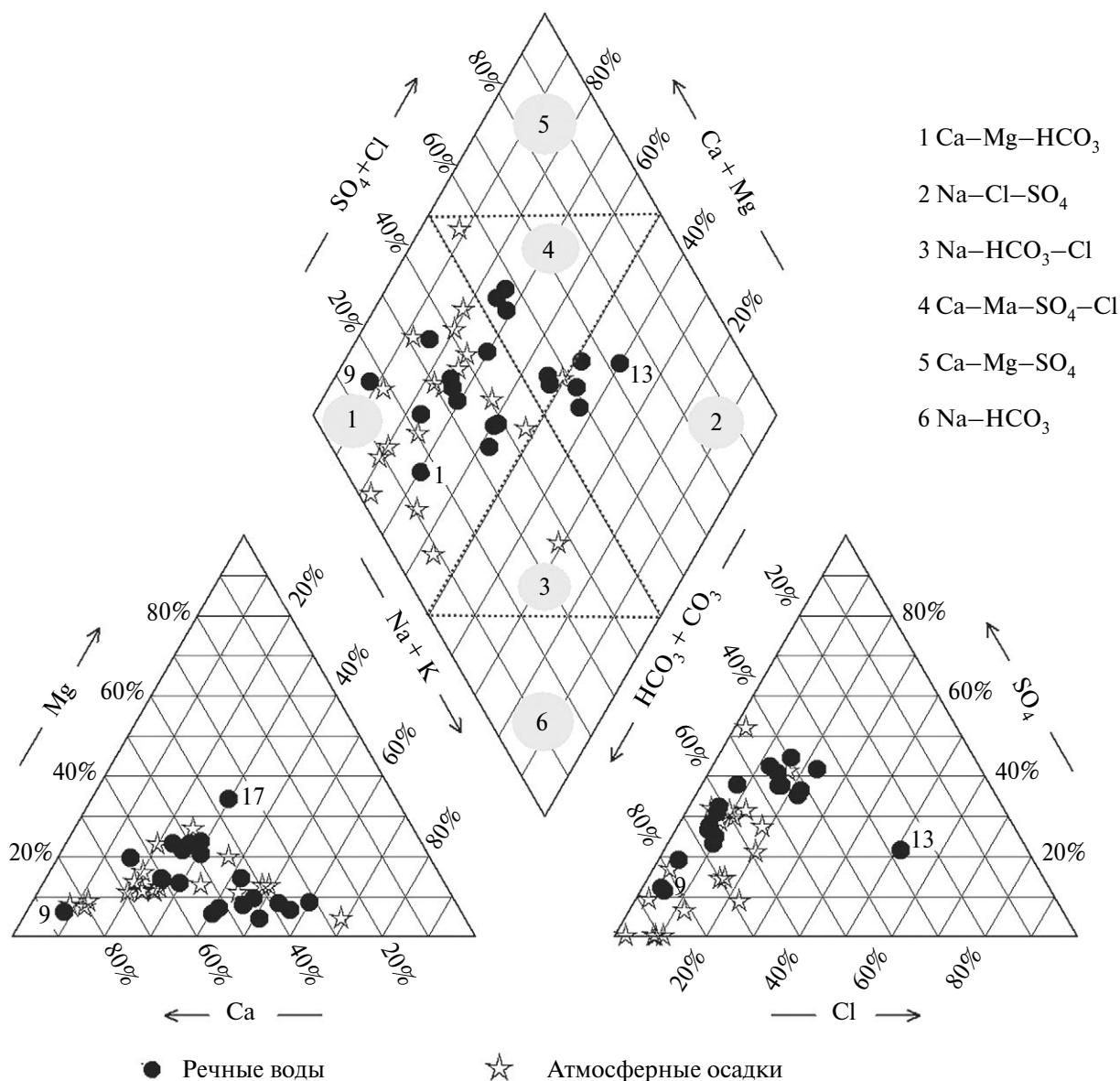


Рис. 5. Химические типы речных вод северо-западного склона Крымских гор на диаграмме Пайпера.

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

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

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

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

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

РЕКА БОДРАК

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

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

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

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

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

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

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

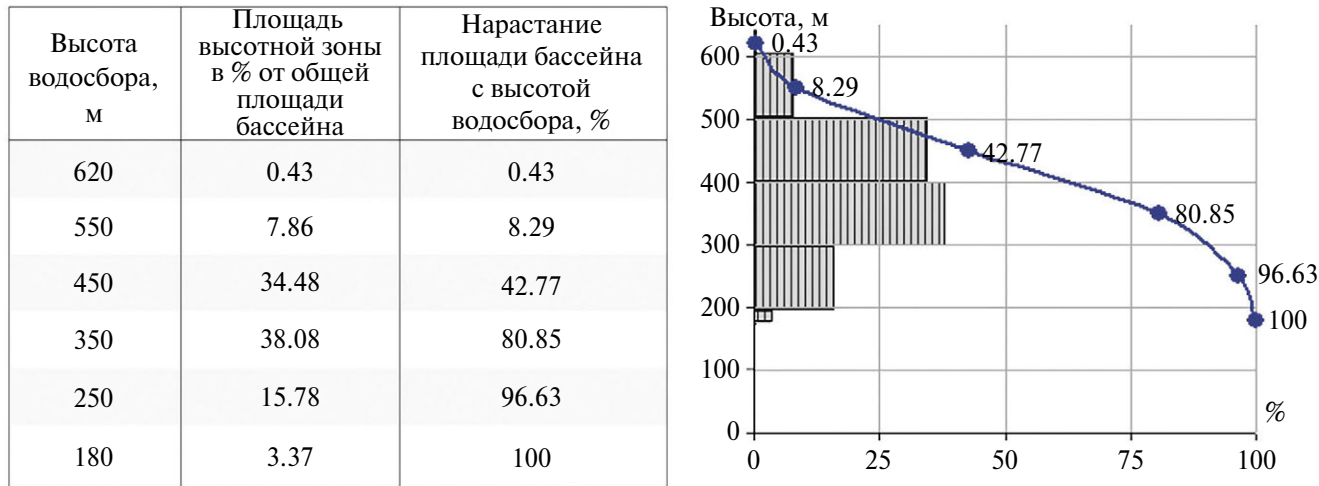


Рис. 6. Распределение площади водосбора р. Бодрак по высотным зонам.

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

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

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

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

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

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

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

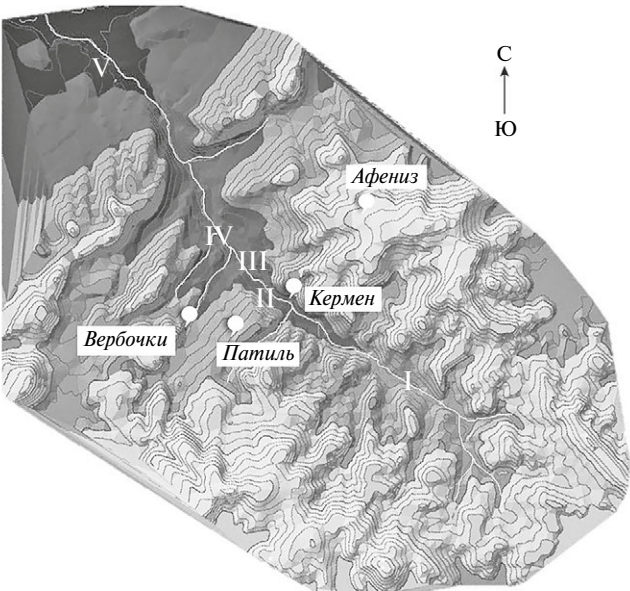


Рис. 7. Водосборный бассейн р. Бодрак.



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

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

Гидрохимический режим р. Бодрак

Среди природных факторов, влияющих на формирование химического состава вод р. Бодрак, большое значение имеет объем речного стока, увеличение которого приводит к уменьшению минерализации воды.

Поскольку сток р. Бодрак зависит от количества атмосферных осадков, рассмотрим первоначально их состав. Формула Курлова для дождевых вод (по данным [12]) выглядит так:

$$\frac{M(0.02-0.07) + HCO_3(42-97) + SO_4(0-52) + Cl(3-23)}{Ca(38-83) + Na(5-31) + Mg(7-27) + Na(14-18) + K(2-29)} \\ pH(6.0-8.3).$$

Атмосферные осадки отбирали в летний период (июнь—июль) в центре д. Трудолюбовки (координаты сбора осадков — 44°47'11.3" с.ш.; 33°59'50.34" в.д.).

В работе [8] подробно описаны особенности химического состава атмосферных осадков. Интересно, что в дождевых водах концентрации ряда элементов (Pb, Ni, Cu, Zn и др.) даже выше, чем в речных водах. Объясняется это тем, что летом воздух нередко насыщен пылеватыми частицами, а опробования при данном исследовании проводились исключительно в летние месяцы, когда дожди непродолжительны.

Несмотря на то, что протяженность русла р. Бодрак небольшая (~16 км), воды пресные и смена их объема в речном стоке Бодрак довольно активная; тем не менее вдоль речного русла обнаруживаются небольшие различия как в макрокомпонентном, так и в микрокомпонентном составе (табл. 3, 4). Это связано с тем, что р. Бодрак протекает с юго-востока на северо-запад вкост простирания горных пород различных стратиграфических подразделений. Подземные воды различных водоносных зон и горизонтов на изучаемой территории имеют специфические черты [9, 11]. Участие этих вод в ионном стоке р. Бодрак проявляется в той или иной степени в различии химического состава по руслу р. Бодрак (табл. 3, 4).

Исток и верхние притоки р. Бодрак формируются между Внутренней и Главной грядями Крымских гор на территории с характерным сопочным рельефом, сложенным флишевыми отложениями (Т₃-J₂ tv). В речных водах в верхнем течении наблюдается преобладание магния в катионном составе и повышенные концентрации сульфатов (по сравнению с участками в нижнем течении реки), минерализации имеют близкие значения:

$$\frac{M(0.5-0.6) + HCO_3(57-62) + SO_4(27-34) + Cl(9-12)}{Mg(40-41) + Ca(37-40) + Na(18-21) + K(1)} \\ pH(7.2-7.5).$$

Похожая картина отмечается и в химическом составе поверхностных вод ставков — открытых водоемов бассейна р. Бодрак [14].

В летние месяцы воды р. Бодрак в среднем течении имеют устойчивый сульфатно-гидрокарбонатный магниевый-кальциевый состав. Фор-

Таблица 3. Химический состав воды р. Бодрак и крупного источника Вербочки в 2003–2022 гг. (н.о. – не определялось; в круглых скобках – количество опробований; н.н. – не нормируется; полужирный шрифт – превышения норм СанПиН 1.2.3685–21)

Зоны на рис. 6	Место отбора пробы	Alt, м	pH, ед.	NO ₃ ⁻ , мг/л	Na ⁺ , мг/л %экв.	K ⁺ , мг/л %экв.	Ca ²⁺ , мг/л %экв.	Mg ²⁺ , мг/л %экв.	Cl ⁻ , мг/л %экв.	SO ₄ ²⁻ , мг/л %экв.	HCO ₃ ⁻ , мг/л %экв.	Ж, мг-экв/л	Мин-я, г/л	УЭП, мСм/см
I	Верховья Бодрак	370	7.2 (1)	3.5 (1)	44.0 (1) 21	3.9 (1) 1	66.0 (1) 37	44.0 (1) 41	36.9 (1) 12	115.0 (1) 27	336.0 (1) 61	6.9 (1)	0.6 (1)	н.о.
I	Бодрак у шлагабаума	350	н.о.	н.о.	28.6 (1) 18	2.9 (1) 1	55 (1) 40	33.9 (1) 41	23.4 (1) 9	120.0 (1) 34	256.2 (1) 57	5.5 (1)	0.5 (1)	0.88 (1)
II	Бодрак у горы Кермен	278	7.6 (14)	7.0 (9)	28.0 (16) 17	5.2 (15) 2	68.2 (22) 48	28.3 (22) 33	19.0 (24) 8	113.4 (11) 33	252.3 (24) 59	5.7 (22)	0.5 (24)	0.63 (19)
III	Бодрак у Тешиного моста	250	7.5 (8)	7.0 (3)	34.9 (10) 19	4.5 (6) 1	80.2 (9) 51	27.5 (9) 29	33.6 (8) 12	106.9 (8) 27	299.8 (9) 61	6.3 (9)	0.6 (9)	0.66 (7)
IV	Источник Вербочки	288	7.0 (5)	13.5 (3)	16.1 (5) 11	1.6 (4) 1	100.6 (6) 81	5.7 (6) 7	16.4 (5) 7	20.7 (5) 7	346.8 (6) 86	5.5 (6)	0.5 (5)	0.65 (8)
V	Бодрак у водозабора	243	7.9 (22)	6.5 (3)	33.4 (20) 21	2.5 (4) 1	66.4 (26) 48	25.2 (26) 30	23.4 (25) 9	93.0 (20) 28	271.5 (26) 63	5.4 (26)	0.5 (21)	0.60 (23)
	Бодрак у Альмы	165	7.9 (2)	54.2 (1)	23.9 (2) 13	4.5 (1) 2	101 (2) 65	19.3 (2) 20	30.2 (2) 11	71.2 (2) 18	351.4 (2) 71	6.6 (2)	0.6 (2)	0.78 (2)
Нормы СанПиН 1.2.3685-21 [24]														
Нормы рыбохозяйственные [22]														
			6–9 н.н.	45 40	200 120	н.н. 50	н.н. 180	50 40	350 300	н.н. 100	н.н.	7 н.н.	1 н.н.	н.н.

Таблица 4. Микрокомпоненты в составе воды р. Бодрак и крупного источника Вербочки в 2003–2010 гг. (полужирный шрифт – превышения норм СанПиН 1.2.3685–21)

Зоны, на рис. 6	Место отбора пробы	Количество проб	Al, мг/л	B, мг/л	Ba, мг/л	Cr, мг/л	Cu, мг/л	Fe, мг/л	Li, мг/л	Mn, мг/л	Ni, мг/л	Pb, мг/л	Si, мг/л	Sn, мг/л	Sr, мг/л	V, мг/л	Zn, мг/л
I	Верховья Бодрак	1	0.25	0.08	0.02	0.001	0.002	0.41	н.о.	0.019	0.002	0.0015	5.1	0.0025	0.30	0.0005	0.031
I	Бодрак у шлагабаума	1	0.20	0.14	0.35	0.002	0.004	0.27	0.005	0.015	0.003	0.0007	4.1	0.0005	0.38	0.0005	0.011
II	Бодрак у горы Кермен	8	0.13	0.11	0.15	0.002	0.003	0.22	0.005	0.010	0.001	0.0007	3.6	0.0032	0.43	0.0006	0.013
III	Бодрак у Тешиного моста	3	0.13	0.11	0.15	0.002	0.003	0.22	0.005	0.010	0.001	0.0007	3.6	0.0032	0.43	0.0006	0.013
	Источник Вербочки	4	0.09	0.05	0.71	0.001	0.003	0.09	0.006	0.003	0.001	0.0019	5.3	0.0012	0.99	0.0007	0.015
IV	Бодрак у водозабора	3	0.26	0.64	0.25	0.006	0.005	0.57	0.007	0.045	0.002	0.0026	4.0	0.0014	0.78	0.0013	0.018
V	Бодрак в нижнем течении	2	0.45	2.18	0.26	0.002	0.003	0.25	0.007	0.010	0.004	0.0010	5.1	0.0005	1.04	0.0015	0.013
Нормы СанПиН 1.2.3685-21 [24]			0.2 0.04	0.5 0.1	0.7 0.74	0.05 0.02(7)	1.0 0.001	0.3 0.1	0.03 0.08	0.1 0.01	0.02 0.01	0.01 0.006	20.0 н.н.	2.0 0.112	7.0 0.4	0.1 0.001	5.0 0.01
Нормы рыбохозяйственные [22]																	

мула Курлова для воды р. Бодрак у водозабора д. Трудюлюбовки имеет следующий вид:

$$M0.5 \frac{HCO_3(71-73)SO_4(18-19)Cl(9-10)}{Ca(65-67)Mg(18-19)Na(13-14)K(1)} \\ pH(7.2-8.4).$$

В отдельных водных пробах (в бездождевые годы), отобранных из р. Бодрак у водозабора д. Трудюлюбовки, в катионном составе на первое место выходил Mg. Это объясняется тем, что, вероятно, в эти годы его доля за счет подземного стока увеличивалась.

В нижнем течении перед впадением р. Бодрак в р. Альму химический состав воды р. Бодрак следующий:

$$M0.6 \frac{HCO_3 71 SO_4 18 Cl 11}{Ca 65 Mg 20 Na 13 K 1} pH 7.9.$$

Воду р. Бодрак зачастую используют в питьевых целях [7, 13]. Это случается в летний период, когда воды для хозяйственно-питьевых нужд не хватает. В табл. 3 и 4 представлены ПДК питьевой воды согласно СанПиН 1.2.3685-21 [24]. Для сравнения также приведены рыбохозяйственные нормативы ПДК вредных веществ [22]. Водным законодательством Российской Федерации установлен запрет на сброс в поверхностные водные

объекты сточных вод без очистки, однако это не всегда соблюдается. Так, данные из табл. 3 и 4 показывают, что в нижнем течении воды р. Бодрак загрязнены. В первую очередь это нитраты, а также ряд микроэлементов (Al, Fe, B). При этом можно видеть, что естественный повышенный фон Fe и Al наблюдается в верховьях р. Бодрак.

В табл. 5 демонстрируются основные статистические показатели химического состава воды р. Бодрак за длительный период наблюдения (2003–2022 гг.), которые свидетельствуют о том, что из всех показателей химического состава воды р. Бодрак лишь pH, УЭП и HCO_3^- относятся к однородной совокупности. Это объясняется в первую очередь климатическими колебаниями, а именно — количеством выпавших атмосферных осадков в каждый конкретный год и температурой приземного воздуха. В летнюю межень воды р. Бодрак трансформируются (концентрируются) под действием испарения, что подтверждается изотопным составом речных вод [9].

Таким образом, вариация концентраций практически всех химических элементов в воде р. Бодрак велика и представленные в табл. 5 средние значения трудно считать типичными. Тем не менее по данным табл. 5 можно судить о максимальных и минимальных значениях.

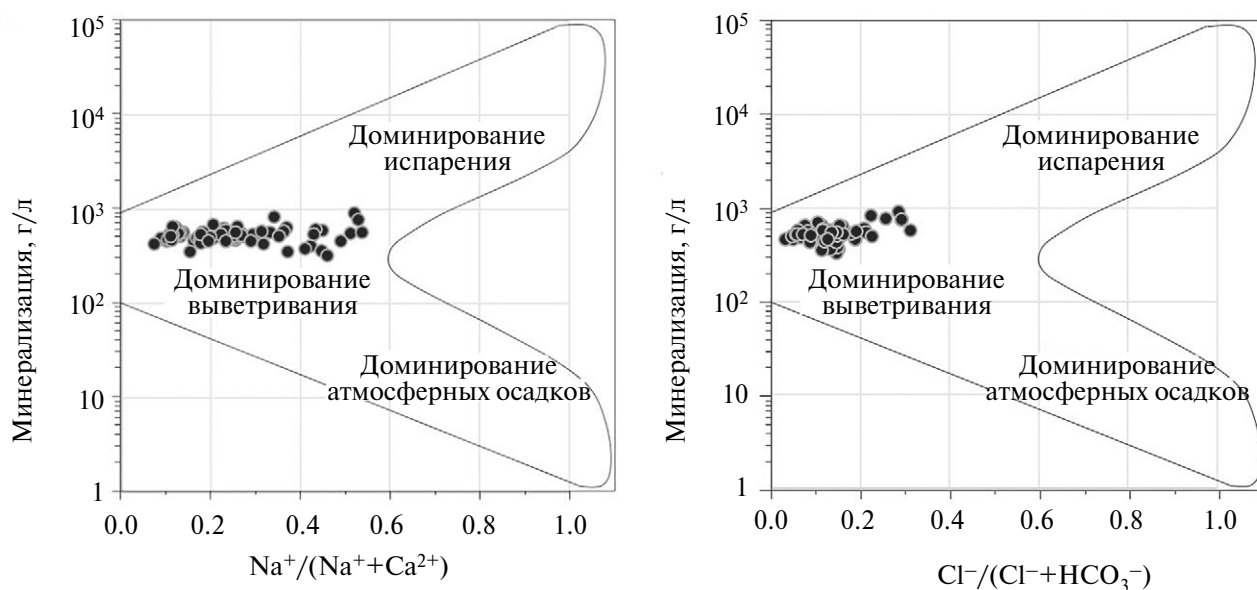


Рис. 9. Основные механизмы формирования химического состава р. Бодрак на диаграммах Гиббса [28].

Таблица 5. Описательная статистика химического состава воды р. Бодрак в 2003–2022 гг.

Статистические показатели	pH, ед.	Na, мг/л	K, мг/л	Ca, мг/л	Mg, мг/л	Cl, мг/л	SO ₄ ²⁻ , мг/л	HCO ₃ ⁻ , мг/л	УЭП, мСм/см	Ж, мг-экв/л	NO ₃ ⁻ , мг/л	Ba, мг/л	B, мг/л	Fe, мг/л	Zn, мг/л	Sr, мг/л	Li, мг/л	Si, мг/л	Al, мг/л	As, мг/л	Cu, мг/л
Количество данных	57	65	40	78	78	80	65	80	73	92	23	28	27	28	28	28	25	28	28	27	28
Среднее	7.7	30.5	4.2	68.6	29.0	24.8	105.7	274.0	0.64	6.0	11.1	0.37	0.31	0.25	0.028	0.54	0.006	4.8	0.213	0.0008	0.013
Минимум	6.8	4.4	1.3	4.8	0.0	0.7	26.4	5.6	0.38	2.4	3.5	0.02	0.08	0.09	0.001	0.30	0.004	1.98	0.002	0.0002	0.001
Максимум	8.8	67.4	7.6	132.0	97.3	75.6	307.2	414.8	1.08	9.2	54.2	1.30	4.27	0.89	0.130	1.23	0.009	15.0	0.77	0.0025	0.23
Медиана	7.8	28.6	4.0	71.7	26.7	23.4	100.0	268.4	0.65	5.8	6.7	0.36	0.12	0.20	0.019	0.45	0.007	4.19	0.2	0.0006	0.005
Коэффициент вариации	6.9	37.8	41.2	35.5	59.1	50.4	42.7	22.7	16.2	40.4	101.5	70.2	261.4	65.2	109.3	39.0	25.9	54.3	64.2	73.7	337.4

Статистические показатели	Cd, мг/л	Co, мг/л	Cr, мг/л	Mn, мг/л	Mo, мг/л	Ni, мг/л	P, мг/л	Rb, мг/л	Sb, мг/л	Se, мг/л	Sn, мг/л	Th, мг/л	Ti, мг/л	Tl, мг/л	U, мг/л	V, мг/л
Количество данных	28	28	28	28	28	28	28	22	28	27	28	22	28	28	22	28
Среднее	0.0002	0.0002	0.0029	0.0130	0.0004	0.0020	0.0014	0.0009	0.0004	0.0007	0.0016	0.0001	0.0049	0.0002	0.0009	0.0008
Минимум	0.0000	0.0001	0.0005	0.0001	0.0001	0.0005	0.0000	0.0002	0.0001	0.0005	0.0000	0.0001	0.0005	0.0001	0.0002	0.0003
Максимум	0.0050	0.0006	0.0128	0.0690	0.0009	0.0050	0.0055	0.0013	0.0025	0.0025	0.0044	0.0006	0.0361	0.0025	0.0018	0.0023
Медиана	0.0000	0.0002	0.0020	0.0089	0.0004	0.0018	0.0009	0.0011	0.0002	0.0005	0.0010	0.0001	0.0029	0.0001	0.0009	0.0006
Коэффициент вариации	424.5	52.3	87.1	123.1	38.5	45.4	92.6	36.5	160.3	86.5	79.7	140.9	143.9	267.0	36.8	57.8

Для выяснения основных природных механизмов, обуславливающих формирование химического состава воды р. Бодрак (точнее – преобладающего источника растворенных солей в речных водах), построены диаграммы Гиббса (рис. 9).

Предложенные Р. Гиббсом диаграммы процессов показывают доминирование трех основных естественных механизмов, контролирующих химический состав поверхностных вод: атмосферные осадки, выветривание горных пород и испарение [28]. В исследуемом случае вклад процессов выветривания в формирование химического состава речных вод преобладает.

В процессе химического выветривания – взаимодействия воды и породообразующих минералов – в составе речных вод создается определенная комбинация основных ионов.

Термодинамическое моделирование использовано и для оценки степени насыщения природных

вод бассейна р. Бодрак основными породообразующими минералами (карбонатами и алюмосиликатами). Для оценки степени неравновесности вод по отношению к минералам применяют индекс насыщения SI (“saturation index”), который показывает вероятность осаждения твердой фазы из раствора. Раствор перенасыщен, если $SI > 0$, и недонасыщен, если $SI < 0$. При $SI = 0$ водный раствор находится в равновесии с минералом. SI вычисляют как десятичный логарифм отношения произведения активностей ионов P_a к константе растворимости K соединения или минерала при заданной температуре: $SI = \log P_a/K$.

В табл. 6 представлены данные о степени насыщения речных вод некоторыми карбонатными и алюмосиликатными минералами на разных участках р. Бодрак. Для сравнения приведены расчеты для атмосферных осадков и некоторых источников.

Для рассмотрения выбраны минералы, характеризующие горные породы бассейна р. Бодрак:

Таблица 6. Степень насыщения природных вод бассейна р. Бодрак по отношению к некоторым минералам (КПШ – калиевый полевошпат)

Зоны на рис. 6	Водные объекты	Степень насыщения		
		Недонасыщенные $SI < -0.2$	Равновесные $-0.2 < 0 < 0.2$	Пересыщенные $SI > 0.2$
	Атмосферные осадки	Са-монтмориллонит, барит, иллит, сидерит, кальцит, арагонит, гипс, КПШ, ангидрит, доломит		К-слюда, каолинит, гиббсит
I	р. Бодрак в верхнем течении	Кальцит, арагонит, сидерит, доломит, гипс, ангидрит	КПШ	К-слюда, каолинит, Са-монтмориллонит, иллит, гиббсит, барит,
II	р. Бодрак у горы Кермен	Кальцит, арагонит, сидерит, доломит, гипс, ангидрит		К-слюда, каолинит, Са-монтмориллонит, иллит, гиббсит, барит, КПШ
IV	р. Бодрак у водозабора	Арагонит, доломит, гипс, ангидрит	Кальцит, сидерит	К-слюда, каолинит, Са-монтмориллонит, иллит, гиббсит, барит, КПШ
V	р. Бодрак в нижнем течении	Арагонит, доломит, сидерит, гипс, ангидрит	Кальцит	К-слюда, каолинит, Са-монтмориллонит, иллит, гиббсит, барит, КПШ
	Родник Кермен	Арагонит, КПШ, доломит, сидерит, гипс, ангидрит	Кальцит	К-слюда, каолинит, Са-монтмориллонит, иллит, гиббсит, барит
	Родник Патиль	Арагонит, доломит, КПШ, сидерит, гипс, ангидрит	Кальцит	К-слюда, каолинит, Са-монтмориллонит, иллит, гиббсит, барит
	Родник Афениз	Доломит, сидерит, гипс, ангидрит	Кальцит, арагонит, КПШ	К-слюда, каолинит, Са-монтмориллонит, иллит, гиббсит, барит

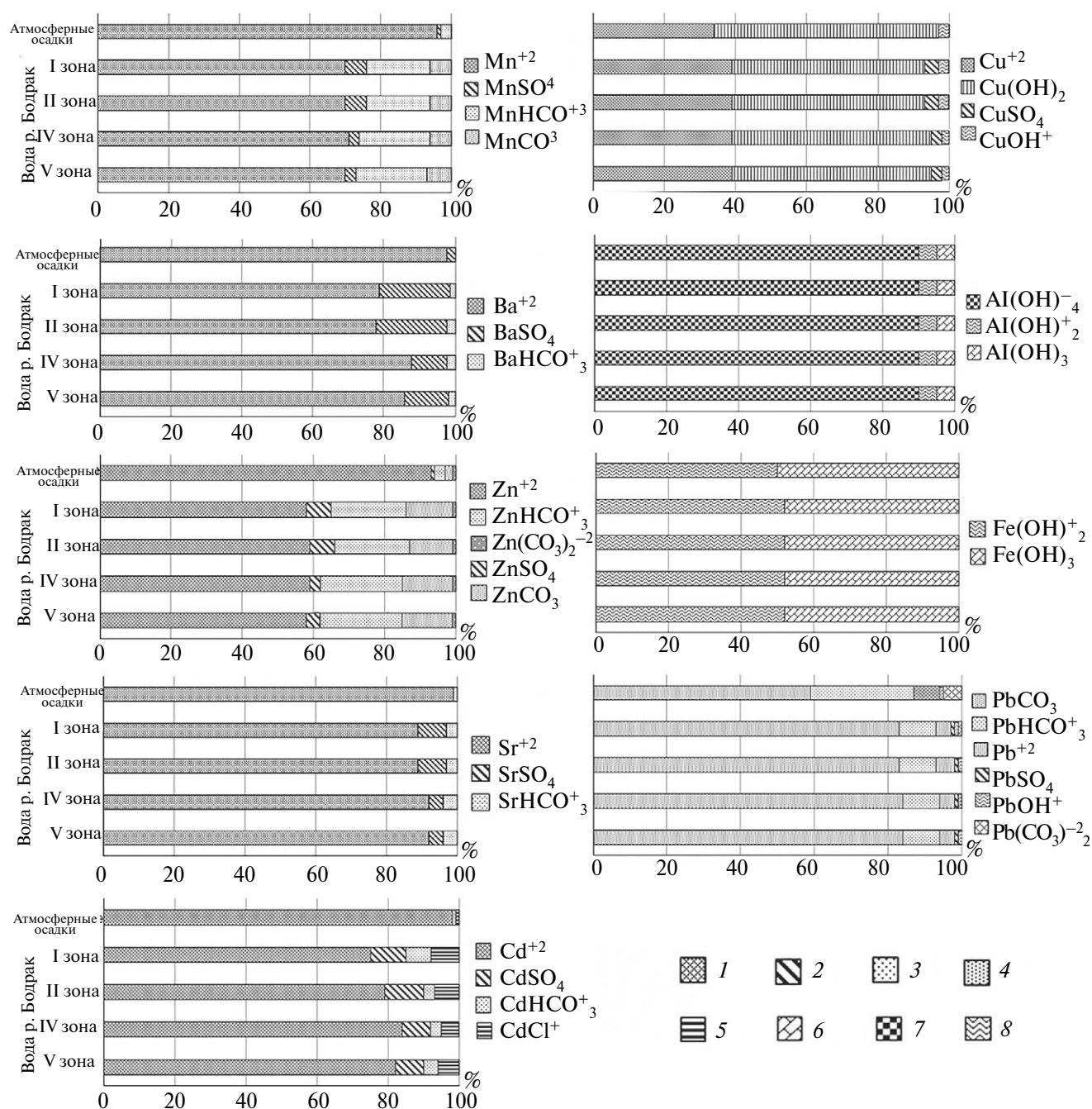


Рис. 10. Результаты термодинамических расчетов распределения основных форм тяжелых металлов в водах р. Бодрак и атмосферных осадков (зоны показаны на рис. 7). Растворенные формы металлов: 1 — свободные ионы; 2 — сульфатные комплексы; 3 — гидрокарбонатные комплексы; 4 — карбонатные комплексы; 5 — хлоридные комплексы; 6 — нейтральные гидроксидные комплексы; 7 — аниогенные гидроксидные комплексы; 8 — катиогенные гидроксидные комплексы.

карбонатные (кальцит, доломит, арагонит, сидерит), сульфатные (гипс, ангидрит, барит), некоторые алюмосиликаты (полевошпат, монтмориллонит, каолинит, иллит, гиббсит, слюда).

Положительные SI (слюды, каолинит, гиббсит) для атмосферных осадков работают в пользу наличия в воздухе пылевых частиц. Воды в верховьях р. Бодрак недонасыщены по кальциту и пересыщены некоторыми алюмосиликатами.

Ниже впадения в р. Бодрак ручья Московского оврага (сток которого обеспечивают подземные воды источника Вербочки) воды р. Бодрак становятся равновесны с кальцитом. В среднем и нижнем течении р. Бодрак (области III, IV, V на рис. 6) сток происходит главным образом за счет подземных вод, генетически связанных с карбонатными породами.

Для вод р. Бодрак рассчитаны (на основе программы PHREEQC Interactive 2.15.0) наиболее вероятные миграционные формы химических элементов без учета органических форм, поскольку органические вещества не изучались.

Основные катионы — калий и натрий — в 100% случаев мигрируют в виде свободных катионов (K^+ , Na^+). Кальций и магний мигрируют в виде Ca^{2+} и Mg^{2+} в 88–92% случаев, ~10% связываются в катионные гидрокарбонатные комплексы $CaHCO_3^+$ и $MgHCO_3^+$. Карбонатные и гидрокарбонатные ионы вносят наибольший вклад в комплексообразование. Железо мигрирует в 52% случаев в виде катионных гидроксидных комплексов $Fe(OH)^{2+}$ и нейтральных гидроксидных комплексов $Fe(OH)_3$. Доминирующая (90%) форма миграции для алюминия — $Al(OH)_4^-$.

Формы миграции химических элементов в подземных и поверхностных водах зависят как от внутренних факторов (радиус ионов, валентность, энергетические свойства и др.), так и от внешних (рН и Eh среды, температура, давление, концентрация растворенного вещества). Изучение форм миграции элементов имеет большое значение при оценке качества воды, а также помогает понимать механизмы и процессы формирования химического состава природных вод. Так, разные формы миграции одного и того же

элемента имеют разную токсичность, а значит — разное воздействие на живые организмы (в том числе и человека). Наибольшую токсичность проявляют свободные (гидратированные) ионы металлов и их гидроксокомплексы [16, 17].

Полученные в результате термодинамических расчетов данные о формах нахождения тяжелых металлов в водах р. Бодрак и атмосферных осадков (без учета соединений с органическими радикалами) свидетельствуют о преобладании свободных незакомплексованных форм и их гидроксокомплексов. Таким образом, в водах р. Бодрак преобладают именно токсичные формы тяжелых металлов, однако общие концентрации металлов часто не превышают санитарные нормы (табл. 4).

Вариации миграционных форм тяжелых металлов в водах р. Бодрак по руслу реки незначительны (рис. 10). Тем не менее заметно, что в верхнем течении р. Бодрак процентное содержание сульфатных комплексов выше, чем в нижнем течении. Рыбохозяйственные санитарные нормы [22] существенно строже современных норм СанПиН [24]: воды р. Бодрак по ряду микрокомпонентов (Al, Cu, Fe, Mn, Sr, Zn) не соответствуют современным рыбохозяйственным стандартам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реки северо-западного склона Крымских гор относятся к категории малых. Речные воды, как правило, пресные, за исключением приустьевых участков, где происходит фильтрация морских вод или есть антропогенное загрязнение. Преобладающий тип вод (не затронутый антропогенным воздействием) — гидрокарбонатный магниево-кальциевый. К доминирующим механизмам, контролирующим формирование химического состава речных вод, относится выветривание горных пород.

В верховьях р. Бодрак химический состав вод формируется в основном за счет выветривания алюмосиликатов. В среднем и нижнем течении реки доминирующие процессы формирования химического состава — растворение и выщелачивание карбонатных пород.

Минерализация рек меняется в широких пределах, увеличиваясь по направлению с юго-востока на северо-запад. Для летнего периода минерализация меняется от 0.3 г/л в верховьях рек до 1 г/л в нижнем течении. Наименьшая минерализация речных вод связана с зимними и весенними осадками.

Исследования, проводимые в бассейне р. Бодрак, свидетельствуют о том, что концентрации растворенных форм металлов имеют некоторые вариации на отдельных участках речного русла, обусловленные изменением геолого-гидрогеологических условий и антропогенным воздействием населенных пунктов.

В летние месяцы воды р. Бодрак в среднем течении имеют устойчивый сульфатно-гидрокарбонатный магниево-кальциевый состав. В верховьях реки (на территории развития флишевых отложений) наблюдается преобладание магния в катионном составе речных вод и повышенные концентрации сульфатов (по сравнению с участками в нижнем течении реки). За период наблюдения тип вод не изменился.

Повышенные концентрации некоторых элементов (Al, Fe) в речных водах обусловлены как естественными причинами (такими как литологический состав пород), так и воздействием сельскохозяйственных и коммунально-бытовых стоков.

Выявлены некоторые изменения средних содержаний микроэлементов по продольному профилю р. Бодрак, главным образом в нижнем течении реки (перед впадением р. Бодрак в р. Альму).

Хорошее качество речных вод обеспечивается источником Вербочки (имеющим гидрокарбонатно-кальциевый состав) и родниковым стоком Ленинградского оврага. Воды р. Бодрак используются для питья, хозяйственных целей, орошения, водопоя скота.

Естественный химический состав воды р. Бодрак может быть использован в качестве индикатора экологического состояния поверхностных вод региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автономная республика Крым. Атлас / Под ред. *Н.В. Багрова, Л.Г. Руденко*. Киев; Симферополь: Ин-т географии НАН Украины, 2003. 80 с.
2. *Альбов С.В.* Гидрогеология Крыма. Киев: Изд-во АН УССР, 1956. 321 с.
3. *Блага Н.Н.* Геоморфологический анализ долины Западного Булганака в пределах Внутренней гряды Крымских гор // Уч. записки Крымского федерального ун-та. География. Геология. 2022. Т. 8. № 2. С. 134–145.
4. Гидрогеология СССР. Т. 8. Крым / Под ред. *В.Г. Ткачук*. М.: Недра, 1970. 365 с.
5. *Иванютин Н.М.* Изучение влияния антропогенной деятельности на экологическое состояние реки Альма // Современное состояние, проблемы и перспективы развития аграрной наук: Материалы III Междунар. конф. Ялта: Ариал, 2018. С. 252–253.
6. Карта подземных вод L-36, L-37. Государственная геологическая карта СССР (Симферополь). Карта подземных вод (1983). Масштаб: 1 : 000 000 / Под ред. *И.Н. Павловец*. СПб.: ВСЕГЕИ, 1986.
7. *Каюкова Е.П.* Водные ресурсы и проблемы водопользования в восточной части Бахчисарайского района // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность — 2017: Материалы конф. 11–15 сентября 2017 г. Севастополь: Севастопольский гос. ун-т, 2017. С. 605–609.
8. *Каюкова Е.П.* Гидрохимические особенности атмосферных осадков полигона Крымской геологической практики СПбГУ // Вестн. СПбГУ. Сер. 7. Геология, география. 2011. Вып. 2. С. 26–43.
9. *Каюкова Е.П.* Химический и изотопный состав природных вод бассейна реки Бодрак (Юго-Западный Крым. Материалы V Всерос. конф. “Полевые практики в системе высшего образования” / Под ред. *В.В. Аркадьева*. СПб.: ВВМ, 2017. С. 153–156.
10. *Каюкова Е.П., Аркадьев В.В.* Крымская учебная практика по геологическому картированию студентов Санкт-Петербургского государственного университета / Под ред. *В.В. Аркадьева* // Геология Крыма: Ученые записки кафедры осадочной геологии СПбГУ. Вып. 3. СПб.: ЛЕМА, 2021. С. 23–42.
11. *Каюкова Е.П., Барабошкина Т.А., Филимонова Е.А.* Гидрогеохимические особенности подземных вод бассейна р. Бодрак (Качинское поднятие Горного Крыма) // Вестн. МГУ. Сер. 4, Геология. 2020. № 4. С. 55–63.

12. Каюкова Е.П., Котова И.К. Экологическая оценка химического состава дождевых осадков в пределах Внутренней гряды Крымских гор // Вестн. СПбГУ. Сер. 7. Геология, география. 2012. Вып. 1. С. 39–49.
13. Каюкова Е.П., Филимонова Е.А. Качество пресных подземных вод Горного Крыма (долина р. Бодрак) // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 2022. № 1. С. 79–88.
14. Каюкова Е.П., Харитоновна Н.А., Филимонова Е.А., Чарыкова М.В. Формирование химического и изотопного составов поверхностных вод открытых водоемов бассейна реки Бодрак (северо-западный склон Крымских гор) // Вод. ресурсы. Т. 49. № 4. 2022. С. 492–505.
15. Лебединский В.И. Геологические экскурсии по Крыму. Симферополь: Таврия, 1988. 144 с.
16. Линник П.Н. Содержание лабильной фракции металлов в поверхностных водах как важный элемент при оценке их потенциальной токсичности // Гидробиол. журн. Т. 46. 2010. № 6. С. 90–104.
17. Линник П.Н., Набиванец Б.И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 269 с.
18. Миньковская Р.Я., Ингеров А.В. Гидрохимическая характеристика рек севавтопольского региона // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2010. № 22. С. 265–281.
19. Никитин М. Ю., Болотов С. Н. Геологическое строение Крымского учебного полигона МГУ. Ч. 2. Уч. пособие. М.: Изд-во МГУ, 2007. 110 с.
20. Объяснительная записка к Государственной геологической карте Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000. Третье поколение. Сер. Скифская. Л. L-36 (Симферополь) / Составители Л.А. Фиколина, С.В. Белецкий, О.А. Белокрыс и др. СПб.: ВСЕГЕИ, 2019. 979 с.
21. Погода и Климат. Справочно-информационный портал.: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения: 13.02.2024)
22. Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 (ред. от 10.03.2020) “Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения” (Зарегистрировано в Минюсте России 13.01.2017 № 45203).
23. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрогеологические характеристики. Т. 6. Украина и Молдавия / Под ред. М.М. Айзенберга, М.С. Каганера. Вып. 4. Крым. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 344 с.
24. Санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”.
25. Тагильцев С.Н., Сурганов С.В., Тагильцев В.С., Куриченко А.А. Оценка ресурсов подземных вод в прибрежной части юго-западного Крыма // Современная гидрогеология: актуальные вопросы науки, практики и образования. Тр. Всерос. конф. Сочи. 2023. М.: МГУ, 2023. С. 117–123.
26. Хильчевський В.К., Осадчий В.І., Курило С.М. Регіональна гідрохімія України: підручник. Київ: ВПЦ “Київський університет”, 2019. 343 с.
27. Юдин В.В. Геологическое строение Крыма на основе актуалистической геодинамики. Симферополь, 2001. 46 с.
28. Gibbs R.J. Mechanisms controlling world water chemistry // Sci. 1970. № 170. P. 1088–1090.
29. Piper A.M. A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water-Analyses // Eos, Transactions Am. Geophys. Union. 1944. № 25. P. 914–928.

ABOUT THE FORMATION OF CHEMICAL COMPOSITION OF RIVER WATERS OF THE NORTH-WESTERN SLOPE OF THE CRIMEAN MOUNTAINS

E. P. Kayukova*

St. Petersburg State University, St Petersburg, 199034 Russia

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

The main factors in the formation of the chemical composition of river waters of the northwestern slope of the Crimean Mountains have been studied, and the ecological state of river waters has been assessed. The data for the presented work were obtained as a result of summer field work in 2003–2022. The chemical composition of rivers is not constant and varies depending on meteorological conditions of a particular year and anthropogenic impact. The influence of geological and hydrogeological conditions on the composition of macro- and microcomponents in natural waters of the region is shown. Concentrations of chemical elements in surface waters of the Bodrak River basin can be used as natural (background) contents of chemical elements.

Keywords: rivers of the north-western slope of the Crimean Mountains, surface water, chemical composition, Gibbs diagrams, saturation indices, migration forms