

ПРОБЛЕМЫ ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ
АРИДНЫХ РЕГИОНОВ

УДК 556.3;550.46;551.50

ФОРМИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО И ИЗОТОПНОГО СОСТАВА
ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ОТКРЫТЫХ ВОДОЕМОВ БАСЕЙНА
РЕКИ БОДРАК (СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ СКЛОН КРЫМСКИХ ГОР)¹

© 2022 г. Е. П. Каюкова^а, *, Н. А. Харитонов^а, Е. А. Филимонов^а, М. В. Чарыков^а

^аСанкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, 199134 Россия

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

*e-mail: epkayu@gmail.com

Поступила в редакцию 23.12.2021 г.

После доработки 16.02.2022 г.

Принята к публикации 28.02.2022 г.

При исследовании основных факторов формирования химического и изотопного состава поверхностных вод открытых водоемов (ставков) бассейна р. Бодрак использованы гидрохимические и изотопные методы. Отдельное внимание отведено изучению дождевых вод, поскольку химический и изотопный состав атмосферных осадков, а также их количество имеют большое значение при изучении геохимических особенностей и водного баланса поверхностных водоемов. Работа базируется на фактическом материале, полученном во время долгопериодических наблюдений: гидрохимический мониторинг проводилось в течении 2003–2007 гг., а изотопное опробование ($\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$) осуществлялось с 2012 по 2018 гг. Анализ данных показывает, что химический и изотопный состав поверхностных вод изучаемой территории зависит от количества атмосферных осадков и паводковых вод, метеоусловий, геолого-гидрогеологической обстановки, обуславливающей притоки подземных вод, и антропогенных факторов.

Ключевые слова: атмосферные осадки, поверхностные воды, химический состав, стабильные изотопы, Горный Крым.

DOI: 10.31857/S0321059622040083

ВВЕДЕНИЕ

Собственные водные ресурсы Крыма весьма ограничены, и их всегда было недостаточно для покрытия питьевых и хозяйственных нужд полуострова. До 2014 г. значительная часть воды (2400 млн м³) поступала по Северо-Крымскому каналу из Днепра и только 500 млн м³ давали местные реки и подземные воды [2].

В настоящее время проблема питьевой воды в Крыму стоит остро как никогда, хозяйственно-питьевое водоснабжение Республики Крым обеспечивается преимущественно из собственных подземных и поверхностных источников. В связи с этим количественные и качественные характеристики существующих на полуострове локальных пресных вод, от которых зависит санитарно-эпидемиологическое благополучие местного на-

селения, нуждаются в тщательном изучении и мониторинге.

В государственном докладе “О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Республике Крым” за 2019 г. сообщается, что доля населения, получающего качественную питьевую воду по Крыму в целом, составляет 74.1%, однако в Бахчисарайском районе ситуация гораздо лучше – 97.1%. Это связано с тем, что здесь верховья рек, в том числе и истоки р. Бодрак, формируются на необжитых заповедных территориях.

На естественный речной сток действуют в первую очередь метеофакторы – осадки, температура приземного воздуха (влияющая на испарение), роза ветров, а также геоморфологические и геолого-гидрогеологические условия и растительность.

Режим крымских рек – паводочный, для его сохранения и дальнейшего использования в хозяйственно-питьевых целях в долинах рек по балкам и оврагам строят водоемы (местное название –

¹ Работа Н.А. Харитоновой и Е.А. Филимоновой выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема 0126-2021-0001, государственная регистрация 121040700170-9).

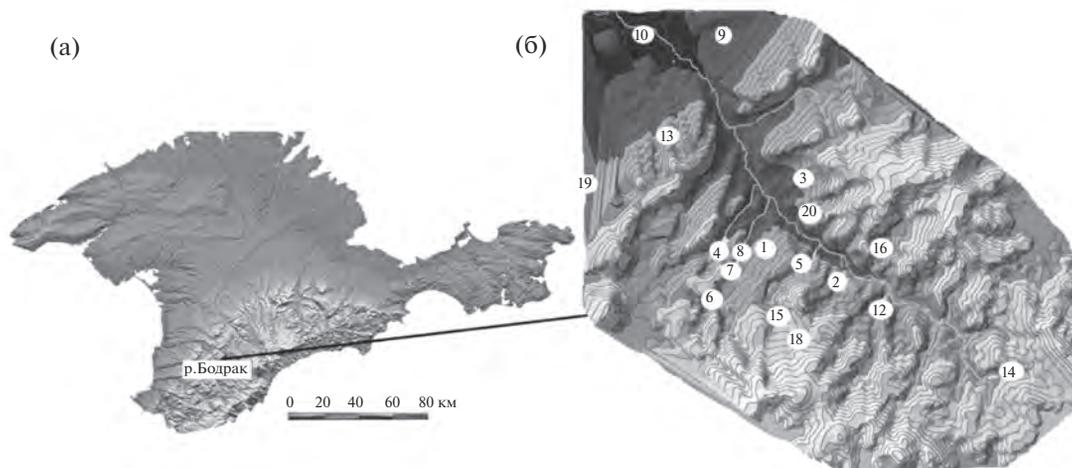


Рис. 1. Район работ: а – обзорная карта; б – рельеф бассейна р. Бодрак с точками опробования открытых водоемов (ставков). Водоемы: 1 – Воронежский (на склоне г. Патиль), 2 – Ексиментий, 3 – Колхозный, 4 – Ленинградский (Шары), 5 – Мангушский, 6 – Мендер (верховья Московского оврага), 7 – Мендер (А), 8 – Мендер (В), 9 – Мраморный, 10 – Скалистое (у дороги), 12 – Широкий Яр, 13 – Корабелка, 14 – Кагульчик, 15 – Юркин (под г. Шелудивой), 16 – Музачи (Музаран), 18 – Верхнесадовый, 19 – Глубокий Яр, 20 – Аммонитовый.

ставки). Эти воды играют важную роль в гидрологическом цикле.

В настоящее время, когда водохозяйственный комплекс Крыма ориентируется на собственные ресурсы, изучение формирования химического и изотопного состава природных вод приобрело особое значение. Знания об условиях формирования и механизмах трансформации химического состава водных ресурсов территории дает возможность проводить полноценную оценку качества хозяйственно-питьевых вод [12], выявлять очаги загрязнения и природные аномалии. Сведения об изотопном составе природных вод позволяют прогнозировать отдельные трудно поддающиеся измерениям элементы водного баланса (такие, как испарение и подземный сток), изучать климатические изменения, вносить коррективы при управлении водными ресурсами территории.

Первые гидрохимические исследования подземных и поверхностных вод в восточной части Бахчисарайского района Крыма проводились преподавателями Московского государственного университета в конце 1990-х гг. Содержания основных анионов и катионов были получены объемным методом (натрий и калий суммарно расчетным путем) [18]. Существенный вклад в изучение пресных вод, используемых в питьевых целях, внесли Т.А. Барабошкина и В.Ю. Березкин при эколого-геологическом картографировании бассейна р. Бодрак [3].

К началу XXI в. полигон, хорошо изученный в геологическом отношении, был существенно недообследован в гидрогеологическом отношении.

К этому времени появилась потребность не только в понимании гидрогеологических условий, но и в оценке качества пресных вод, используемых в питьевых целях. С 1998 г. на постоянной основе преподавателями и студентами Санкт-Петербургского государственного университета проводится комплексное изучение природных вод бассейна р. Бодрак, ведется мониторинг их экологического состояния [8, 10, 22].

В начале 2000-х гг. впервые были получены данные по концентрациям целого ряда микрокомпонентов и соединений азота в пресных водах района с использованием современных инструментальных методов.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследования находится на северо-западных склонах Крымских гор в долине р. Бодрак, протекающей в пределах Бахчисарайского района Крыма мимо с. Трудюлюбовка и пос. Скалистого до пос. Новопавловка, где она впадает в р. Альму, текущую на 3 к Черному морю (рис. 1). В зависимости от направления стока поверхностных вод все реки Крымского п-ова делятся на пять групп; р. Альма относится к рекам северо-западных склонов Крымских гор, впадающих в Черное море.

Горная часть Крымского п-ова представляет собой три гряды, протянувшиеся с ЮЗ на СВ вдоль берега Черного моря. Крымское предгорье – Вторая (Внутренняя) и Третья (Внешняя) гряды – окаймляет Главную гряду с северной стороны.

Предгорья – область питания артезианских бассейнов равнинного Крыма. Протяженность Внутренней гряды – 125 км, средние высоты – 400–600 м, протяженность Внешней гряды – 114 км, средние высоты – 200–300 м [2].

В пределах Второй (Внутренней) гряды преобладает структурный куэстовый рельеф, обусловленный эрозионным расчленением мел-палеогеновых песчано-глинистых и карбонатных отложений различной прочности, широко развиты холмы, столовые плато, овраги, малые реки и временные водотоки. Наибольшую высоту в юго-западном Крыму имеет г. Сель-Бухра (656 м) [13], относительные превышения достигают 100 м. Внутренняя и Внешняя гряды отделены друг от друга Северным эрозионно-аккумулятивным межгрядовым понижением, возникновение которого обязано врезанием в мягкие породы верхнего эоцена боковых притоков, пересекающих понижение в поперечном направлении.

Бассейн р. Бодрак занимает площадь в пределах Внутренней предгорной гряды Крымских гор и Южного эрозионно-денудационного межгрядового понижения на северо-западном крыле Качинского поднятия. Вторая гряда представляет собой хребет с куэстовым рельефом, расчлененный речными долинами, оврагами и балками.

Южное межгрядовое понижение – сложная сеть оврагов и балок, сформированных в результате глубокой эрозии песчано-сланцевых триасово-юрских и частично среднеюрских отложений, обнажающихся на северных склонах Главной гряды [14].

Истоки р. Бодрак формируются на юго-западных склонах хребта Азарпсырт (абс. отм. – 560 м) и северных склонах г. Вольской (абс. отм. – 486 м). Рельеф здесь холмистый, расчлененный многочисленными оврагами и балками постоянных и временных водотоков, преобладают узкие водоразделы. Русло р. Бодрак линейно вытянуто с уклоном в верхнем течении 28‰, заложение долины происходило преимущественно по зонам трещиноватости и тектонических нарушений.

Все крымские реки зарегулированы. В долинах рек существуют водохранилища и ставки (пруды) – небольшие искусственно созданные водоемы сезонного регулирования для накопления и сохранения дождевых и паводковых вод с целью дальнейшего использования в водохозяйственных целях. Ставки в местных условиях строят главным образом путем перегораживания балок, наполнение их осуществляется за счет стока воды с водосборной поверхности в период весеннего снеготаяния и интенсивных дождевых осадков.

Ставки имеют специальные конструкции, которые позволяют при необходимости (в засушливый период) сливать воду и таким образом питать подрусловой поток р. Бодрак. Это в свою очередь

отражается на уровне воды в местных водозаборных сооружениях.

Общая площадь зеркала водоемов (ставков) бассейна р. Бодрак ~30 га. Существует около двух десятков водоемов сезонного регулирования, наиболее значительные из них – Мангушский, Воронежский, Широкий Яр, Эксиментий, Мендер, Колхозный, Юркин, Кагульчик. В них собирается большая часть поверхностного стока зимне-весеннего периода, которая может использоваться в маловодные летне-осенние периоды. Дополнительно у преобладающей части водоемов существует подземный тип питания.

Самый крупный ставок – Мраморный (или Марсианское озеро) – весьма интересный гидрогеологический объект. Водоем образовался в 1999 г. в бывшем карьере нуммулитовых известняков. В 1990-х гг. здесь шла добыча инкерманского известняка, разработка проводилась открытым способом, трещинные воды, поступающие в карьер в процессе резки блоков, периодически откачивали.

В настоящее время Мраморный ставок используется в рекреационных целях. Водоем представляет собой прямоугольник размером 200 × 400 м, средняя глубина его 15–18 м. С глубиной температура воды резко понижается (до 3–5°C) за счет действующих на глубине многочисленных источников, самый мощный из которых функционирует в юго-восточной части водоема. Озеро зимой никогда не замерзает. Вмещающие отложения представлены слабо закарстованными массивными органогенными нуммулитовыми известняками лютетского яруса среднего эоцена.

Геолого-гидрогеологические условия

Исследуемая территория находится в зоне сочленения двух основных региональных тектонических структур Крымского п-ова – Горно-Крымского складчатого сооружения и эпигерцинской Скифской платформы [1].

Нижний структурный этаж (ядро Качинского поднятия) сложен триасово-юрскими интенсивно дислоцированными комплексами. В составе нижнего структурного этажа выделяют три структурно-фациальных подэтажа: один представлен сложноскладчатыми флишами (в основном опрокинутого залегания) таврической серии (T_3-J_1), второй – тектонически раздробленными флишидами (T_3-J_1), третий – дислоцированным вулканогенно-осадочным комплексом (J_2b) мощностью >1500 м (рис. 2).

Верхний структурный этаж (северо-западное крыло Качинского поднятия) с резким угловым несогласием перекрывает нижний. В целом это моноклиналь, сложенная терригенно-карбонатными породами мелового и палеогенового воз-

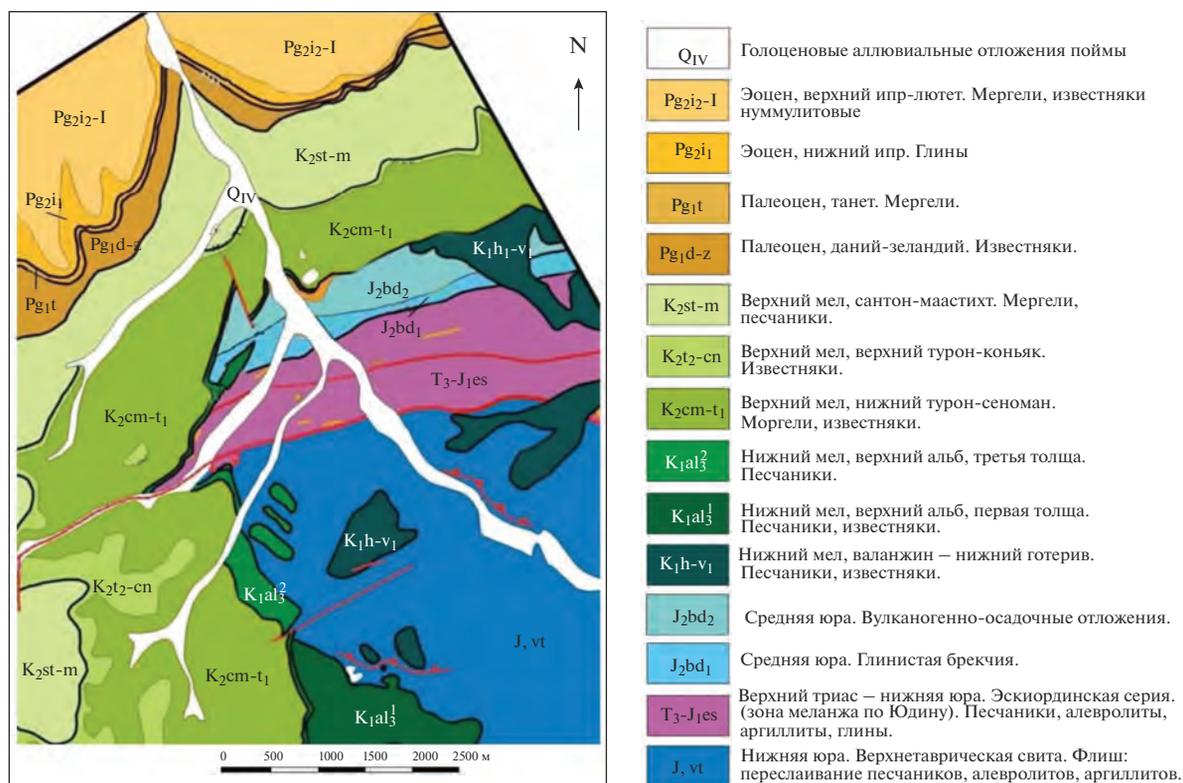


Рис. 2. Геологическая схема района исследования, по материалам [4].

раста, падающая полого на СЗ под углами 8°–12°. В структуре этажа наблюдается ряд угловых и азимутальных несогласий.

Главная гряда служит внешней областью питания артезианских бассейнов Равнинного Крыма. Внутренняя и Внешняя гряды расположены в краевых частях южных крыльев артезианских бассейнов, они играют роль внутренней области питания. Внутренняя гряда сформирована породами мел-палеогенового возраста (известняки, мергели, глины); Внешняя гряда – отложениями неогенового возраста. Обе гряды имеют характерный куэстовый рельеф.

В.В. Юдиным здесь выделены коллизионные швы (сутуры): Предгорная мезозойская и Северо-Крымская палеозойская. Асимметричные гряды в Крымском предгорье из слабодислоцированных толщ мел-неогенового возраста названы Куэстовой моноклиналью [23].

Климат

По данным метеостанции г. Симферополя, за последние 40 лет температура воздуха менялась в среднем на +0.3°С каждые 5 лет, что связано с глобальными климатическими изменениями; вероятно, в ближайшие годы тенденция сохранится.

На рис. 3 показаны метеоданные (среднегодовые значения температуры приземного воздуха и среднегодовые суммы осадков, доли от годовой нормы, %) за последние 20 лет.

За норму годового количества осадков взяты их среднегодовые величины за 130 лет наблюдений на метеостанции г. Симферополя (524 мм) [15]; за климатическую норму температуры – среднее ее значение за период 1961–1990 гг. (+10.3°С) [6].

В течение четырех лет после 2014 г. метеоусловия в Крыму благоприятствовали формированию естественного стока. Однако в 2019 г. осадков выпало на 20% меньше нормы, и это отразилось на формировании объема естественных водных ресурсов: снега и жидких осадков оказалось недостаточно для полноценного заполнения водохранилищ естественного стока и многочисленных ставков в предгорьях Крыма.

В крымском Предгорье в последние десятилетия наблюдаются рост потепления и колебание увлажнения территории (причем благополучных по водности лет случается гораздо меньше). В последнее десятилетие температура приземного воздуха держится на 20% выше нормы 1961–1990 гг. с устойчивой тенденцией к увеличению на 1.5–2.0% в год (рис. 3), по данным метеостанции г. Симферополя [15].

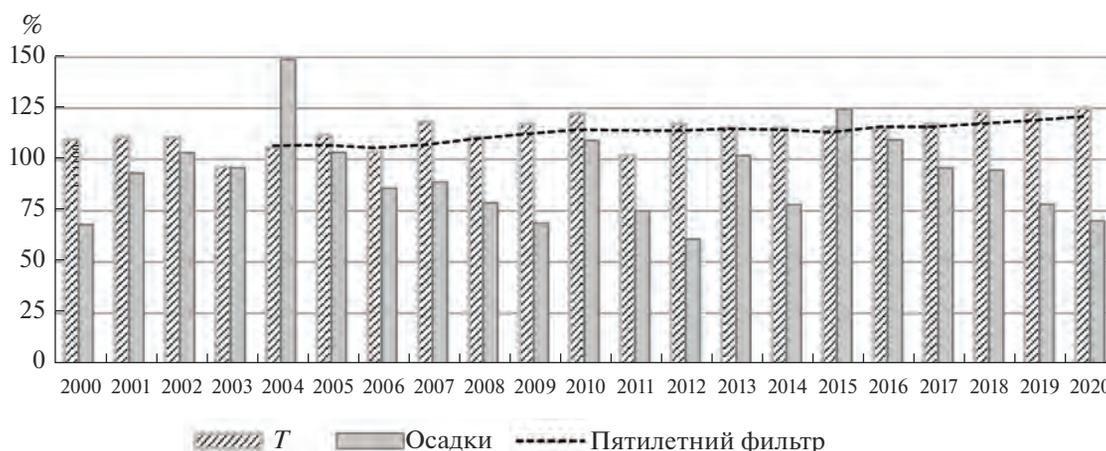


Рис. 3. Изменение температуры приземного воздуха T и количества осадков за период 1961–1990 гг., % нормы (по данным метеостанции г. Симферополя, индекс 33946 [15]).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе представлены данные по химическому и изотопному составу поверхностных вод открытых водоемов. С 2003 по 2007 г. было проведено 34 опробования поверхностных вод из ставков бассейна р. Бодрак на микро- и макрокомпоненты. Изучение изотопного состава проводилось с 2012 по 2018 г. Все опробования проводились в летний сезон.

Температура и pH были измерены с использованием портативных приборов фирмы “HANNA” непосредственно у водопункта. Пробы воды на макрокомпоненты отбирались в пластиковые бутылки объемом 1.0–1.5 л. Концентрации Cl^- , HCO_3^- измерены в лаборатории базы СПбГУ в Крыму объемным методом. Содержание SO_4^{2-} определяли: весовым методом в лаборатории кафедры гидрогеологии СПбГУ и методом турбидиметрии на портативном колориметре DR/890 Nach. Содержание микрокомпонентов (29 компонентов) и основных катионов определяли методами ICP AES (атомно-эмиссионный спектрометр ICAP61E) и ICP MS (масс-спектрометр “Agilent 7500”) в лаборатории ГУП “Водоканал”. Пробы предварительно консервировали азотной кислотой из расчета на 50 мл пробы 1 мл азотной кислоты (2%).

Определение изотопного состава водорода и кислорода выполнялось в лаборатории изотопной геологии флюидов (ЛИГФ) СПбГУ и рентгенодифракционных методов исследований (РДМИ) Научного парка СПбГУ. Для измерений использовался лазерный анализатор изотопного состава воды “Picarro L-2120-I”. Погрешность измерений составляет $\pm 0.1\%$ по $\delta^{18}\text{O}$ и $\pm 1\%$ по δD . В качестве стандартов использованы внутрилабораторные образцы сравнения, привязанные к стандар-

там МАГАТЭ V-SMOW-2, GISP и SLAP. Пробы воды для изотопного анализа отбирались в пробирки 10–20 мл.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Химический состав открытых водоемов (ставков) бассейна р. Бодрак зависит от ряда факторов — состава атмосферных осадков, паводковых вод, метеоусловий в течение года, подземных вод, антропогенных факторов.

Ионный состав атмосферных осадков характеризуется пестротой, однако в летние месяцы главную роль из анионов играют гидрокарбонаты, а из катионов — обычно кальций (90% всех изученных проб). Средние эквивалентные концентрации имеют следующую последовательность: для анионов — $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$, для катионов — $\text{Ca}^{2+} > (\text{Mg}^{2+} \text{ или } \text{Na}^+) > \text{K}^+$.

Среди всех макрокомпонентов только содержания кальция в наибольшей степени зависят от продолжительности и интенсивности выпадения осадков (что связано с запыленностью атмосферы в летний период). Его концентрации ощутимо меняются при пересчете на средневзвешенные количества, так как короткие летние дожди более минерализованы за счет наличия пылевых частиц в атмосфере [7].

Исследованные воды открытых водоемов имеют низкую минерализацию, варьирующую от 0.1 до 0.8 г/л (табл. 1), которая сильно колеблется даже в пределах одного ставка в зависимости от сезона и года опробования. Наименее минерализованный — ставок Кагульчик в верховьях р. Бодрак. Минерализацию поверхностных вод обуславливают главным образом количество атмосферных осадков, выпавших за гидрологический год, тем-

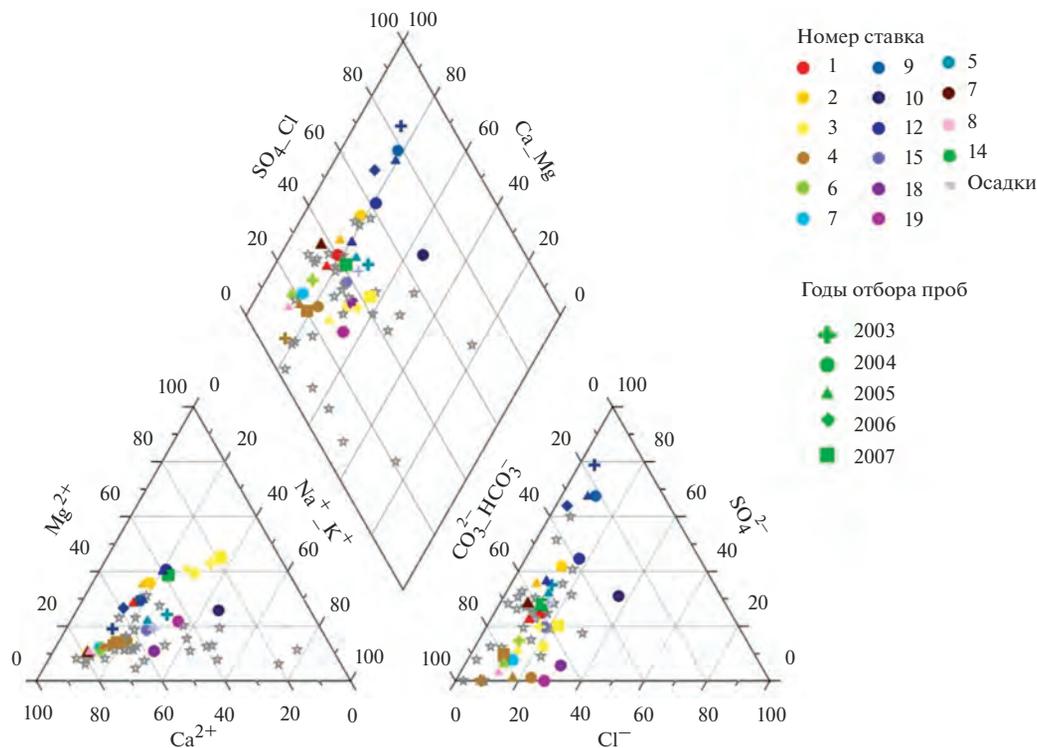
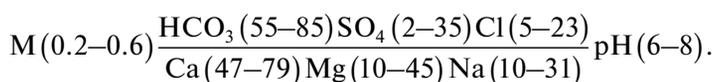


Рис. 4. Химический состав дождевых и поверхностных вод на диаграмме Пайпера. Номера точек опробования соответствуют водоемам на рис. 1 и в табл. 1.

пература в летний период (обеспечивающая испарение) и притоки подземных вод.

pH изученных вод меняется от 5.40 до 8.54, и минимальное значение зафиксировано в ставке Воронежском в 2005 г. В целом, воды всех ставок — нейтральные или слабощелочные.

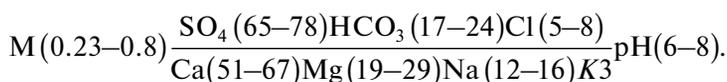
По своему ионному составу поверхностные воды ставок разнообразны, в большинстве своем это воды умеренно жесткие сульфатно-гидрокарбонатно-магниево-кальциевого или гидрокарбонатно-кальциевого состава:



В ставках, расположенных ближе к верховьям р. Бодрак, содержание ионов Mg (в эквивалент-процентах) выше, чем в ставках, расположенных в среднем течении реки. В ставке Кагульчик, расположенном в верховьях, концентрации Mg^{2+} и Ca^{2+} равны.

Химический состав поверхностных вод представлен на диаграмме Пайпера (рис. 4), из которой видно, что фигуративные точки ставок и

атмосферных осадков располагаются в одной области. Это указывает на идентичность их химического состава и свидетельствует о преобладании дождевого питания в водном балансе водоемов. На общем фоне выделяются воды Мраморного ставка, расположенного в бывшем карьере нумулитовых известняков (п. Скалистое). Здесь в анионном составе преобладают сульфаты:



Практически двухкратное превышение содержания сульфат-иона по сравнению с другими во-

доемами бассейна р. Бодрак объясняется значительной долей подземного питания — за счет

Таблица 1. Макрокомпонентный состав открытых водоемов бассейна р. Бодрак

Код точки	Дата от пробования	Место отбора пробы	pH	Минерализация (расчетная)		Жесткость мг-экв/л	мг/л							
				г/л	SO ₄ ²⁻		HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NO ₃ ⁻	
1	01.06.2003	Воронежский	8.20	—	—	3.60	—	—	—	15.0	1.7	49.0	14.0	3.9
	10.07.2004		8.54	0.24	40.31	2.74	—	17.7	13	1.4	35	12	—	—
2	11.07.2005	Ексиментий	—	0.28	40.10	3.17	152.5	17.0	14.0	1.4	42.0	13.0	25.2	—
	01.06.2004		7.93	0.44	125.04	5.07	170.8	28.4	25	1.8	57	27	—	—
3	03.07.2005	Колхозный	7.30	0.61	144.52	7.11	292.8	24.9	31.0	2.0	83.0	36.0	2.5	—
	01.06.2003		8.40	0.62	78.82	5.62	329.4	51.1	57.0	15.0	40.0	44.0	23	—
4	01.06.2004	Ленинградский	8.36	0.57	48.22	5.48	317.2	60.28	47	15	47	38	6.88	—
	11.07.2005		6.50	0.56	38.71	5.44	341.6	39.1	41.0	11.0	48.0	37.0	70.0	—
5	01.07.2007	Мендер	—	0.45	60.64	4.02	219.6	51.12	44.3	14	24	34.4	—	—
	01.06.2003		7.70	—	—	2.06	170.8	8.5	9.2	0.2	35.0	3.8	32.5	—
6	01.06.2004	Мангуш	7.41	0.16	1.14	1.67	97.6	17.7	10	0.66	27	3.9	11	—
	11.07.2005		6.00	0.22	0.80	2.50	146.4	18.8	9.9	0.8	43.0	4.2	14.2	—
7	05.07.2007	Мендер (А)	—	0.16	10.21	1.83	109.8	8.52	9.16	0.95	30	3.83	—	—
	01.06.2003		8.20	0.50	114.87	4.84	219.6	31.2	36.0	18.0	64.0	20.0	29	—
8	01.06.2004	Мендер (В)	8.22	0.38	178.60	4.12	48.8	42.5	28	15	56	16	24.1	—
	03.07.2005		7.00	0.54	110.56	5.51	244.0	35.9	32.0	16.0	79.0	19.0	26.6	—
9	01.06.2003	Мраморный	7.44	0.33	29.66	3.74	195.2	19.9	13.0	2.7	65.0	6.0	41	—
	01.06.2004		7.59	—	—	6.20	366	31.9	15	0.95	110	8.5	14	—
10	11.07.2005	Мендер (А)	7.00	0.49	18.11	5.67	317.2	28.0	15.0	1.5	100.0	8.2	6.3	—
	01.06.2004		7.50	0.37	17.83	4.18	231.8	24.8	15	1.3	72	7.1	8.1	—
11	11.07.2005	Мендер (В)	7.00	0.52	93.45	6.17	268.4	22.0	17.0	2.0	110.0	8.2	2.7	—
	27.07.2005		7.00	0.47	7.32	5.37	317.2	26.6	16.0	1.5	95.0	7.5	—	—
12	01.06.2003	Мраморный	8.10	0.58	264.4	10.22	122.0	19.9	33.0	12.0	86.7	27.0	7.1	—
	01.06.2004		8.20	0.63	299.51	7.56	122	35.5	32	11	97	33	3.1	—
13	03.07.2005	Ленинградский	7.00	0.56	262.59	6.58	122.0	25.6	31.0	10.0	84.0	29.0	4.6	—
	21.07.2006		—	0.51	231.23	6.01	122	19.88	26	9.3	79	25	—	—
14	01.06.2004	Скалистый	—	0.50	109.56	4.04	146.4	95.7	73	6.4	43	23	—	—
	01.06.2004		7.80	0.36	112.46	4.14	122	31.9	24	2.3	40	26	—	—
15	03.07.2005	Широкий Яр	6.80	0.43	104.05	4.78	195.2	23.4	27.0	2.6	48.0	29.0	2.5	—
	30.06.2007		—	0.22	40.61	2.36	109.8	14.91	14.9	2.0	24	14.4	—	—
16	01.06.2003	Кагульчик	7.45	0.52	95.87	5.12	244.0	38.3	38.0	12.0	76.0	16.0	12.4	—
	01.06.2004		7.33	0.52	67.04	5.27	268.4	46.1	35	12	79	16	14.3	—
17	01.06.2004	Верхнесадловый	7.00	0.60	21.91	5.55	317.2	88.6	48	20	93	11	—	—
	01.06.2004		8.38	—	—	2.47	170.8	39	17	21	33	10	—	—

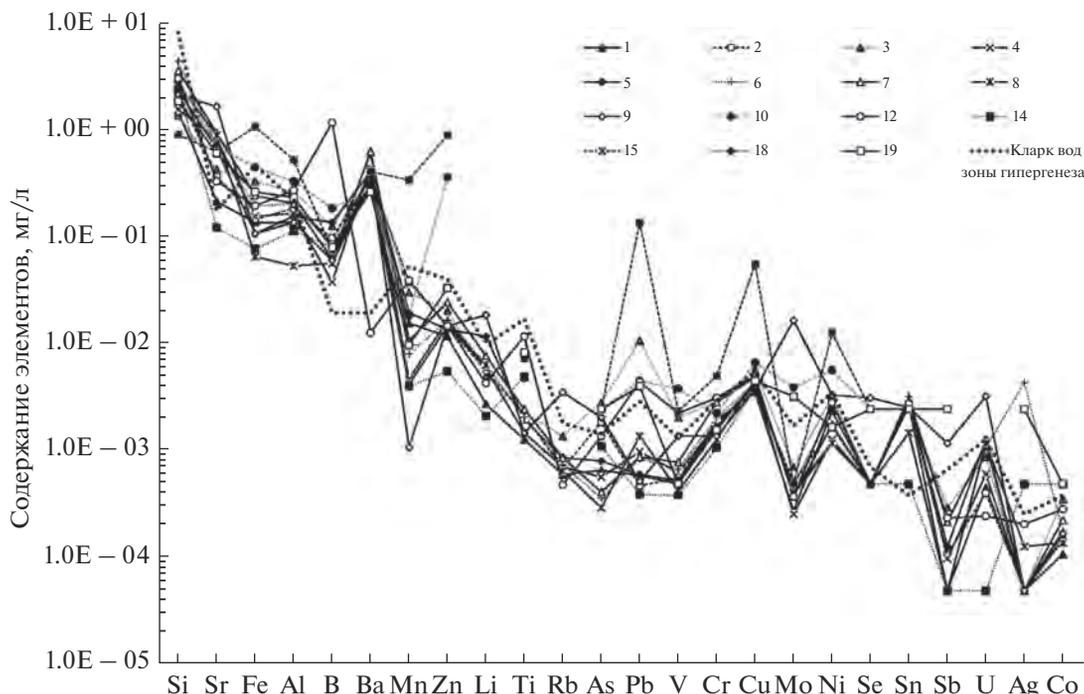


Рис. 5. Содержание отдельных компонентов в поверхностных водах открытых водоемов исследованной территории. Данные опробования 2005 г. Линия кларка элемента в водах зоны гипергенеза построена по данным работы [21]. Номера точек соответствуют данным табл. 1 и рис. 1.

трещинно-жильных вод известняков среднего эоцена.

Особое место на диаграмме занимает ставок, расположенный у трассы в нижнем течении р. Бодрак у пос. Скалистого (точка 10), за счет повышенной доли хлорид-иона (относительно концентраций в других водоемах). Этот ставок испытывает серьезную антропогенную нагрузку (на это указывает геохимическая ассоциация, речь о которой пойдет далее), и хлориды в данном водоеме имеют техногенное происхождение.

Содержание нитратов в водах практически всех ставок на изучаемой территории ниже нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения [16, 17]. Лишь в Колхозном ставке выявлено однократное превышение в 2 раза (табл. 1) при ПДК 40 мг/л, что объясняется периодическими сливами со свинофермы, которая располагается непосредственно у водоема. При этом в большинстве ставок концентрации нитратов выше фоновых в 3–4 раза, и это характерно для сельскохозяйственного района.

Микроэлементный состав исследованных вод весьма разнообразен и приведен в табл. 2 и на рис. 5. Каждый ставок характеризуется водой с индивидуальным набором микрокомпонентов, который контролируется преимущественно локальным геолого-гидрогеологическим строением

территории, где располагается открытый водоем, количеством осадков и величиной испарения.

Концентрации кремния в исследуемых водоемах невысокие, средние значения составляют 2.7 мг/л и варьируют в широких пределах (0.5–7 мг/л): минимальные значения обнаружены в ставке Колхозном, а максимальные в ставке Мендер. В целом, концентрация кремния в водах ставок ниже, чем кларк кремния в водах зоны гипергенеза (8.36 мг/л) (рис. 5). Проведенный мониторинг в течение нескольких лет показывает, что содержание кремния меняется в зависимости от года опробования и места локализации открытого водоема. Максимальные концентрации кремния выявлены во всех ставках в пробах, отобранных в 2004 г. (табл. 2).

Концентрации бора в исследуемых водоемах невысокие – от 0.02 до 1.2 мг/л при среднем значении 0.15 мг/л, которое выше, чем кларк элемента в водах зоны гипергенеза (0.02 мг/л) (рис. 5). Концентрации этого элемента 1.2 и 1.0 мг/л, превышающие ПДК для водных источников (0.5 мг/л), обнаружены в водах двух ставок – Широкий Яр и Юркин соответственно. Источники повышенных концентраций B^{3+} в этих ставках – вероятно, подземные воды, извлекающие бор из осадочных водовмещающих толщ.

Содержания железа сильно варьируют в зависимости от точки и года опробования, но, в це-

Таблица 2. Микрокомпонентный состав открытых водоемов бассейна р. Бодрак

Код точки	Дата опробования	мг/л										мкг/л										Ag	Co			
		Si	Sr	Fe	Al	B	Va	Mn	Zn	Li	Ti	Rb	As	Pb	V	Cr	Cu	Mo	Ni	Se	Sn			Sb	U	
1	01.06.2003	1.2	0.28	0.20	0.11	0.061	0.02	0.016	0.056	—	5.0	—	2.5	0.5	0.5	0.5	1.2	0.5	1.6	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	1.1
	10.07.2004	2.7	0.22	0.03	0.15	0.065	0.01	0.002	0.022	—	1.9	—	2.5	2.3	0.5	0.5	4.0	0.5	0.5	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
	11.07.2005	1.5	0.22	0.14	0.14	0.062	0.33	0.016	0.012	—	2.8	—	0.7	0.6	0.5	2.0	3.6	0.28	2.4	0.5	2.7	0.05	0.46	—	—	0.05
2	01.06.2004	2.4	0.29	0.03	0.15	0.096	0.02	0.005	0.022	—	1.9	—	2.5	4.6	0.5	0.5	4.9	0.5	0.5	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
	03.07.2005	2.3	0.38	0.15	0.19	0.100	0.37	0.039	0.015	5.8	2.2	0.7	1.9	0.5	0.6	1.8	4.0	0.5	1.7	0.5	2.7	1.1	0.41	—	0.05	0.2
	01.06.2003	0.5	0.50	0.26	0.17	0.140	0.05	0.046	0.031	—	0.5	—	2.5	0.5	2.4	0.5	1.2	1.2	3.0	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
3	01.06.2004	3.1	0.48	0.19	0.29	0.140	0.04	0.017	0.023	—	4.1	—	2.5	2.0	2.1	0.5	5.5	0.5	1.9	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
	11.07.2005	1.4	0.44	0.34	0.27	0.130	0.43	0.031	0.021	5.2	2.3	1.4	2.9	11.0	2.1	2.9	5.8	0.72	3.3	0.5	2.7	0.3	0.89	—	0.05	0.4
	01.07.2007	1.6	0.39	1.47	0.95	0.173	0.30	0.177	0.011	5.8	5.0	—	4.8	2.0	5.1	2.3	4.7	0.4	5.1	0.5	0.5	0.15	0.85	—	0.5	1.1
4	01.06.2003	1.3	0.85	0.22	0.02	0.028	0.13	0.004	0.013	—	0.5	—	2.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
	01.06.2004	4.2	0.77	0.07	0.23	0.034	0.13	0.006	0.021	—	2.9	—	2.5	2.6	0.5	0.5	4.5	0.5	1.1	2.5	2.5	2.5	—	—	15.0	0.5
	11.07.2005	1.6	0.84	0.16	0.17	0.039	0.45	0.005	0.017	6.0	1.5	0.7	0.6	1.0	0.6	1.8	4.3	0.26	1.3	0.5	3.2	0.1	0.62	—	0.05	0.2
5	05.07.2007	1.3	0.95	0.14	0.15	0.070	0.40	0.003	0.025	5.3	5.0	—	0.6	0.64	0.6	0.88	3.8	0.23	1.8	0.5	0.5	0.14	0.69	—	0.5	0.17
	01.06.2003	1.6	0.70	0.82	0.35	0.130	0.05	0.030	0.120	—	4.4	—	2.5	1.7	1.5	1.8	1.2	0.5	2.4	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
	01.06.2004	3.8	0.55	0.20	0.24	0.130	0.03	0.091	0.085	—	3.1	—	2.5	3.4	0.5	0.5	5.8	0.5	1.2	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
6	03.07.2005	2.4	0.69	0.11	0.16	0.140	0.42	0.020	0.014	12.0	2.0	0.9	0.8	0.6	0.5	1.7	4.2	0.44	1.2	0.5	2.9	0.13	1.3	—	0.05	0.2
	01.06.2003	2.6	0.91	0.02	0.01	0.043	0.26	0.003	0.002	—	0.5	—	2.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
	01.06.2004	7.0	0.74	0.87	1.00	0.077	0.20	0.025	0.400	—	26.0	—	2.5	6.5	1.8	2.3	8.4	0.5	32.0	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
7	11.07.2005	4.5	0.73	0.20	0.21	0.084	0.59	0.008	0.017	6.6	2.1	0.8	0.4	0.9	0.7	2.1	4.4	0.39	1.8	0.5	3.3	0.23	1.1	—	4.4	0.2
	01.06.2004	2.7	0.82	0.06	0.16	0.063	0.30	0.003	0.025	—	0.5	—	2.5	1.7	0.5	0.5	1.9	0.5	1.5	2.5	2.5	2.5	—	—	84.0	0.5
	11.07.2005	3.7	0.96	0.25	0.21	0.064	0.65	0.011	0.025	7.9	2.5	0.9	0.4	0.9	0.8	2.9	5.0	0.38	1.8	0.5	3.0	0.22	1.2	—	0.05	0.2
8	27.07.2005	2.7	0.92	0.07	0.06	0.058	0.32	0.004	0.015	6.5	—	0.7	0.3	1.4	0.4	1.3	4.7	0.4	1.2	0.5	1.5	0.05	1.2	—	0.13	0.1
	01.06.2003	1.8	1.80	0.20	0.27	0.056	0.19	0.012	0.210	—	0.5	—	2.5	2.0	1.7	1.0	1.2	13.0	4.7	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
	01.06.2004	5.1	1.70	0.25	0.35	0.064	0.36	0.008	0.043	—	4.3	—	2.5	4.6	1.9	1.6	6.5	16.0	3.9	2.5	2.5	2.5	—	—	280.0	0.5
9	03.07.2005	2.2	1.70	0.11	0.14	0.062	0.40	0.001	0.015	19.0	1.5	3.6	2.1	0.5	1.4	1.4	3.8	17.0	3.4	3.2	2.6	1.2	3.3	—	0.05	0.2
	21.07.2006	4.3	2.10	0.29	0.23	0.086	0.71	0.006	0.086	16.0	4.4	1.4	2.5	10.0	1.5	1.6	9.1	16.0	5.2	6.2	0.5	1.9	—	—	0.15	0.24
	01.06.2004	3.0	0.72	0.46	0.34	0.190	0.28	0.019	0.370	—	4.9	—	2.5	4.6	3.9	2.3	6.8	4.0	5.8	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
10	01.06.2004	3.6	0.35	0.12	0.16	0.092	0.01	0.023	0.018	—	1.9	—	2.5	1.9	0.5	0.5	4.6	0.5	1.4	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
	03.07.2005	3.1	0.34	0.20	0.28	1.200	0.01	0.040	0.015	4.4	12.0	0.5	1.4	4.5	2.3	3.2	5.1	3.8	2.9	0.5	2.8	0.24	0.25	—	0.21	0.3
	30.06.2007	2.5	0.13	0.08	0.12	0.082	0.32	0.004	0.006	2.2	5.0	—	1.1	0.4	0.39	1.1	4.0	0.5	2.4	0.5	0.5	0.05	0.05	—	0.5	0.5
14	01.06.2003	1.9	0.91	0.66	0.31	0.110	0.09	0.190	0.016	—	0.5	—	2.5	2.4	1.5	0.5	1.6	0.5	2.2	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
	01.06.2004	5.6	0.92	0.54	1.10	1.000	1.60	0.022	0.039	—	17.0	—	2.5	0.5	1.8	1.6	3.0	1.4	2.6	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
	01.06.2004	0.9	0.64	1.10	0.54	0.077	0.42	0.350	0.920	—	7.5	—	2.5	140	2.4	5.1	57.0	0.5	13.0	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
18	01.06.2004	1.9	0.62	0.27	0.24	0.082	0.27	0.010	0.034	—	8.5	—	2.5	4.1	0.5	1.6	4.6	3.3	1.7	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5
	01.06.2004	1.9	0.62	0.27	0.24	0.082	0.27	0.010	0.034	—	8.5	—	2.5	4.1	0.5	1.6	4.6	3.3	1.7	2.5	2.5	2.5	—	—	2.5	0.5

лом, для $Fe_{\text{общ}}$ характерны низкие значения, ≤ 1.5 мг/л (табл. 2), при среднем значении 0.3 мг/л. Минимальные концентрации железа, 0.02 мг/л, выявлены в ставке Мендер в пробе в 2003 г., однако при более поздних опробованиях количество $Fe_{\text{общ}}$ оказалось существенно выше – 0.2 (2005 г.) и 0.87 мг/л (2004 г.). Максимальные значения $Fe_{\text{общ}}$ (1.47 мг/л) зафиксированы в ставке Колхозном в пробе в 2007 г. В целом, для поверхностных вод ставков характерно превышение $Fe_{\text{общ}}$ относительно ПДК по рыбохозяйственным водоемам (0.1 мг/л) [16], на содержание элемента сильно влияет количество осадков и присутствие в водах органического вещества. В водоемах с высокой биологической продуктивностью наблюдается увеличение содержания железа.

Концентрации лития во всех изученных водах невысокие – 2.2–19.0 мкг/л, они практически равны кларку элемента в водах зоны гипергенеза (рис. 5). Только в двух ставках – Мраморном и Мангуш – выявлены воды с концентрациями лития более чем на порядок выше – 19.0 и 12.0 мкг/л соответственно. Незначительное количество данных по литию не позволяет выявить зависимости его содержания от минерализации.

Распределение стронция, рубидия и бария в водах ставков довольно хаотичное (рис. 5). Содержание Sr^{2+} варьирует от 0.12 до 2.10 мг/л при среднем значении 0.75 мг/л. Максимальные значения (2.1 мг/л) диагностированы в ставке Мраморном в пробе в 2006 г., а минимальные значения (0.13 мг/л) выявлены в ставке Кагульчик. Количество Rb^{+} достаточно низкое и составляет сотые и тысячные доли миллиграмма на литр, что ниже, чем кларк элемента в водах зоны гипергенеза (0.001 мг/л) [21]. Наибольшими концентрациями характеризуются поверхностные воды ставка Мраморного (до 3.6 мкг/л), во всех остальных водах содержания Rb^{+} примерно одинаковые. Повышенные содержания рубидия и стронция в водах ставка Мраморного, вероятно, обусловлены повышенной концентрацией элементов в водовмещающих толщах и их привносом подземными источниками.

Диапазон вариативности содержания бария достаточно велик и составляет 0.01–1.6 мг/л (табл. 2; рис. 5). В целом, количество Ba^{2+} в исследованных водах выше, чем кларк элемента в водах гипергенеза, – 0.02 мг/л. Для всех открытых водоемов выявлены значительные колебания содержания элемента в зависимости от года опробования. Наибольшие концентрации элемента отмечены в пробах в 2005 г. (~1.2 мг/л) и установлены в водах ставка Юркин, расположенного у г. Шелудивой.

Марганец обнаружен в концентрациях ≤ 0.35 мг/л при среднем значении 0.04 мг/л. Наиболее высокие концентрации этого элемента обнаружены в

пробе, отобранной из водоема Верхнесадового, а самые низкие (0.001–0.012 мг/л) выявлены в ставке Мраморном. Для остальных водоемов характерна высокая дисперсность в распределении элемента – 0.0011–0.35 мг/л. Основные факторы, определяющие значительную вариативность концентрации Mn^{2+} , – количество осадков, состав дренируемых пород, присутствие органического вещества и микроорганизмов.

Концентрации Ag, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Ti, V и U относительно низки и составляют тысячные доли миллиграмма на литр. Содержание серебра в водоемах, как правило, примерно одинаковое и равно 0.0025 мг/л, исключение составляют только воды ставка Мраморного и Мендера (А), в которых обнаружены аномально высокие концентрации Ag – до 0.28 и 0.084 мг/л соответственно.

Разброс концентраций кобальта велик и составляет 0.11–1.1 мкг/л, при этом содержания элемента во всех ставках, за исключением ставка Глубокий Яр и Кугульник, ниже, чем в водах зоны гипергенеза (рис. 5). Минимальные содержания кобальта выявлены в ставке Воронежском, расположенном на склоне г. Патиль, а максимальные – в ставке Колхозном. Во всех водах уровень содержания элемента ниже, чем его ПДК для рыбохозяйственных водоемов (0.01 мг/л) [16].

По содержанию хрома исследованные открытые водоемы можно разделить на три группы: с концентрациями до 1.0, 1.0–2.0, и >2.0 мкг/л. Наибольшая концентрация хрома (5.1 мкг/л) выявлена в водах ставка Верхнесадового, и источник элемента, вероятнее всего, – почвы. В целом, исключая воды ставка Верхнесадового, содержание хрома в воде ниже, чем кларк элемента в водах зоны гипергенеза [21]. Во всех исследованных водах содержание элемента ниже, чем его ПДК для рыбохозяйственных водоемов (0.001 мг/л).

Содержание урана низкое – от 0.05 до 3.3 мкг/л при среднем значении 0.95 мкг/л. Максимальная концентрация элемента диагностирована в ставке Мраморном. В целом, уровень урана в исследованных водах ниже (за исключением ставка Мраморного), чем его кларк в водах зоны гипергенеза [21].

Распределение меди в водах открытых водоемов достаточно ровное, концентрации ≤ 10 мкг/л, исключение составляет только ставок Верхнесадовый, содержание элемента в котором почти в шесть раз выше (57 мкг/л). Значительное содержание меди в водах ставка Верхнесадового, более чем в 50 раз превышающее ПДК элемента для вод рыбохозяйственных водоемов [16], обусловлено значительной антропогенной нагрузкой в этом районе.

Содержание свинца в исследованных водах в целом низкое – 0.4–11 мкг/л, соответствует клар-

Таблица 3. Геохимические ассоциации химических элементов в водоемах бассейна р. Бодрак

	Место отбора пробы	Геохимические ассоциации микрокомпонентов
1	Воронежский	Sn _{6,3} –Ba _{6,2} –Ag _{5,8} –Se ₄ –B _{1,5}
2	Ексиментий	Ba _{9,9} –Sn _{6,3} –Ag _{4,4} –Se _{3,3} –B _{2,3} –Sr _{1,8}
3	Колхозный	Ba _{10,4} –Sn ₅ –Ag _{4,8} –B _{3,5} –Se _{3,3} –Sr _{2,4} –V _{1,9} –Pb _{1,8} –As _{1,5} –Al _{1,5}
4	Ленинградский	Ag _{15,6} –Ba _{14,1} –Sn _{5,3} –Sr _{4,6} –Se _{3,3}
5	Мангушский	Ba _{8,6} –Sn _{6,4} –Ag _{5,8} –Se ₄ –Sr _{3,5} –B _{3,2} –Zn _{2,1}
6	Мендер (дальний)	Ba _{17,9} –Ag _{10,8} –Sn _{6,7} –Sr _{4,3} –Zn _{4,1} –Se ₄ –Ni _{3,5} –B _{1,6} –Al _{1,5}
7	Мендер (А)	Ag ₁₄₅ –Ba _{24,2} –Sn _{6,7} –Sr _{4,8} –Se _{3,3} –B _{1,5}
8	Мендер (В)	Ba _{16,3} –Sr ₅ –Sn _{3,7}
9	Мраморный	Ag ₃₇₀ –Ba _{21,2} –Sr _{9,9} –Se _{7,9} –Mo _{7,7} –Sn _{4,9} –Zn _{2,6} –Pb _{1,9} –B _{1,6}
10	Скалистое (у дороги)	Ba _{14,3} –Zn _{10,9} –Ag _{8,6} –Sn _{6,1} –Se _{5,5} –B _{4,5} –Sr _{3,9} –V _{2,5} –Pb _{2,1} –Mo ₂ –Ni _{1,8} –Sb _{1,6}
12	Широкий Яр	B _{15,5} –Sn _{6,5} –Ag _{4,7} –Se _{3,3} –Sr _{1,9}
14	Кагульчик	Ba _{16,3} –B _{2,0} –Ag _{1,7}
15	Юркин	Ba ₄₃ –B _{13,3} –Ag _{8,6} –Sn _{6,1} –Se _{5,5} –Sr _{4,9} –Al _{2,5} –Mn _{2,1} –Sb _{1,6}
18	Верхнесадовый	Pb _{63,3} –Zn _{27,1} –Ba _{21,4} –Cu _{10,2} –Ag _{8,6} –Mn _{7,1} –Sn _{6,1} –Se _{5,5} –Ni _{3,9} –Sr _{3,5} –Fe ₂ –Al _{1,9} – B _{1,8} –Cr _{1,8} –Sb _{1,6} –V _{1,5}
19	Глубокий Яр	Ba _{13,8} –Ag _{8,6} –Sn _{6,1} –Se _{5,5} –Sr _{3,4} –B ₂ –Pb _{1,9} –Mo _{1,6} –Sb _{1,6}

ку элемента в водах гипергенеза (рис. 5). Содержание Pb во всех исследованных водах, за исключением поверхностных вод ставка Верхнесадового (140 мкг/л), не превышает ПДК элемента для вод рыбохозяйственных водоемов [16].

С целью выявления природных и техногенных гидрохимических аномалий в водоемах бассейна р. Бодрак выделены геохимические ассоциации химических элементов (табл. 3). Для оценки интенсивности аномалии использован коэффициент концентрации: $K_c = C_i/C_\phi$, где C_i – средняя концентрация i -го химического элемента в выборке, C_ϕ – фоновая концентрация этого элемента. В качестве фоновых содержаний использованы средние концентрации химических элементов в водах зоны гипергенеза [11, 21]. При сравнении этих данных с естественной геохимической ассоциацией подземных вод изучаемой территории [8, 11]: Ba (2.0–58.2) – B (1.1–10.3) – Ag (3.2–8.6) – Sr (1.6–8.4) – Sn (3.4–4.9) – выявлено, что антропогенному влиянию подвержены ставки с номерами 3, 6, 9, 10, 15, 18, 19. Самым загрязненным из них оказался ставок на ул. Верхнесадовой в пос. Прохладном. Такой вывод сделан на основе анализа коэффициентов концентрации элементов ассоциации.

Стоит отметить, что в водах Мраморного ставка определены повышенные относительно природного фона концентрации молибдена, цинка и свинца. Это объясняется большим количеством отдыхающих в летний период, приезжающих непосредственно к водоему на частных машинах.

При этом проба воды на анализ была отобрана у самого берега.

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ

Для интерпретации данных изотопного состава использована линия Крейга – глобальная линия метеорных вод [20]: $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$. Изотопные данные выражают в относительных единицах: $\delta R(\%) = (R_{\text{пр}}/R_{\text{ст}} - 1) \times 1000$, R – атомные отношения изотопов водорода ($^2\text{H}/^1\text{H}$) или кислорода ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) в пробе ($R_{\text{пр}}$) и стандарте ($R_{\text{ст}}$); δ – отношение стабильных изотопов относительно стандарта, ‰. Величина δ показывает, насколько проба обеднена ($\delta < 0$) или обогащена ($\delta > 0$) тяжелым изотопом в сравнении со стандартом ($\delta = 0$).

В табл. 4 показаны концентрации стабильных изотопов ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$, ‰) в водах открытых водоемов бассейна р. Бодрак. Из таблицы видим, что изотопный состав одного и того же водоема может варьировать, что объясняется колебаниями температуры воздуха (при высокой температуре происходит испарение) и количества атмосферных осадков (которые имеют более легкий изотопный состав по сравнению с подземными водами). На рис. 6 результаты измерений представлены относительно глобальной линии метеорных вод. Два десятка образцов воды из ставок были отобраны в летний период в 2012, 2013, 2014 и 2018 гг.

Таблица 4. Стабильные изотопы в водах открытых водоемов бассейна р. Бодрак

Дата отбора	Место отбора пробы	Номер на схеме	$\delta^{18}\text{O}, \text{‰}$	$\delta^2\text{H}, \text{‰}$
2012 г., июль	Мангушский	5	-4.1	-42
	Воронежский	1	-2.8	-36
	Кагульчик	14	-4.5	-42
	Музачи (Музаран)	16	-3.4	-37
	Широкий Яр	12	-8.2	-60
	Мраморный	9	0	-17
2013 г., июль	Колхозный	3	-9.5	-62.4
	Мангушский	5	1.4	-12.3
	Воронежский	1	1.4	-11.5
2014 г., июнь	Воронежский	1	-6.1	-43
2014 г., июль	Воронежский	1	-5.7	-43
	Ексиментий	2	-5.8	-47
	Колхозный	3	-2	-25
	Мангушский	5	-6.4	-44
	Мраморный	9	-1.9	-23
	Аммонитовый	20	-4.8	-36
	Корабелка	13	-3.3	-27
	Мраморный	9	-0.4	-14
2018 г., июль	Воронежский	1	-3.9	-37

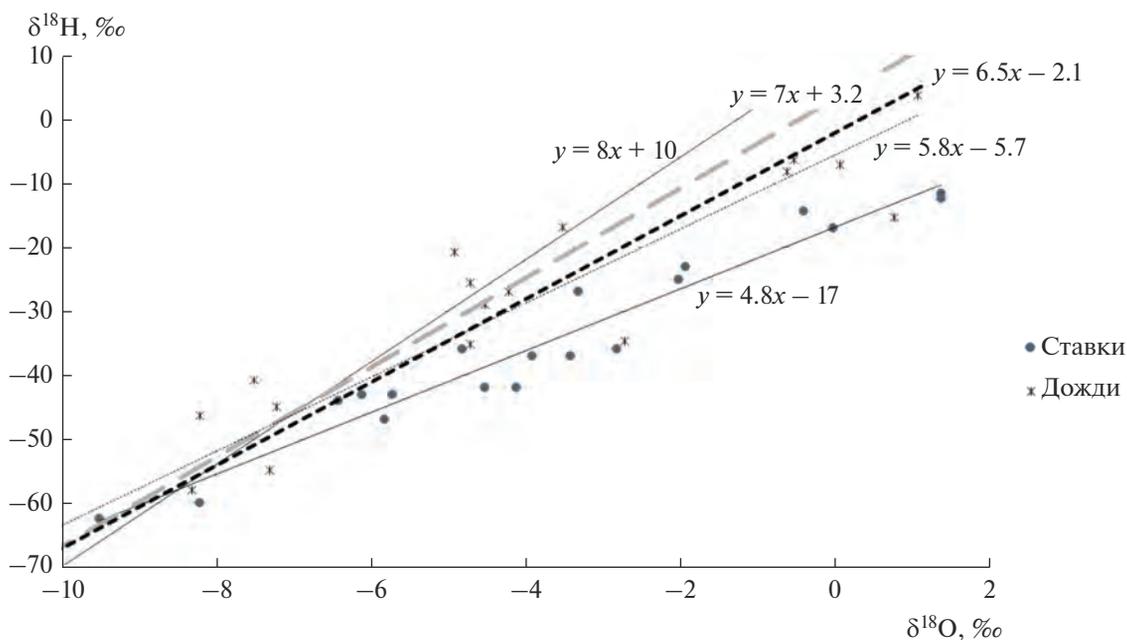


Рис. 6. Фигуративные точки открытых водоемов (ставков) на диаграмме $\delta^{18}\text{O}-\delta^2\text{H}$.

Ранее в [9] был детально изучен изотопный состав атмосферных осадков, собранных на территории крымской базы СПбГУ в с. Трудолюбовка в летний период. В результате этих исследований на основании корреляционных соотношений сезонных содержаний $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в атмосферных осадках и внутригодовых изменений температуры приземного воздуха получена расчетная линия метеорных вод: $\delta^2\text{H} = 6.5 \delta^{18}\text{O} - 2.1$, которая также показана на диаграмме (рис. 6). Для расчета использовались средневзвешенные значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ осадков по данным метеостанции в пос. Почтовом с учетом высотного градиента. На диаграмме также приведена локальная линия метеорных вод для северного склона Крымских гор, рассчитанная на основе фактических данных [5].

Изотопный состав природных вод может меняться за счет фракционирования (разделения) изотопов водорода и кислорода под воздействием ряда факторов; основные из них на изучаемой территории – процессы испарения, которые имеют определенные закономерности [19]. Вероятно, в отдельных случаях возможен изотопный обмен с водовмещающими породами, но эти процессы не повсеместны, так как район расположен в области активного водообмена.

В результате фракционирования фигуративные точки природных вод могут смещаться относительно линии метеорных вод, и их расположение в рамках диаграммы $\delta^{18}\text{O}-\delta^2\text{H}$ позволяет сделать некоторые диагностические выводы (например, выявить основной сезон наполнения водоемов).

Изменения изотопного состава природных вод при испарении фиксируются снижением углового коэффициента (тангенса угла наклона) линий регрессии до 4–6 [19, 20]. Ставки заполняются сезонно дождевыми и паводковыми водами р. Бодрак, значительную роль при этом играют притоки подземных вод. Обычно к концу лета за счет процессов испарения вода в ставках обогащается тяжелыми изотопами по сравнению с водами исходного состава. Угловой коэффициент для ставок опробования 2012 и 2014 гг. составил 5.1. Если судить по испарительной линии ставок ($y = 4.8, x = 17$), в начальной стадии их наполнения вода имела следующие изотопные характеристики: $\delta^{18}\text{O} = -8.8\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} = -59\text{‰}$ (по точке пересечения с расчетной линией метеорных вод), что соответствует весенним месяцам (март–апрель). В работе, посвященной оценке испарения по изотопным данным [19], предполагается, что за счет испарения пруды теряют до 70–90% годового объема.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На фоне глобального изменения климата в крымском Предгорье в последние десятилетия наблюдается устойчивая тенденция повышения температуры приземного воздуха на 1.5–2.0% в год.

Изотопный состав воды указывает на то, что наполнение водоемов осуществляется, главным образом, в зимне-весенний период за счет атмосферных осадков, а летом значительная часть этих вод испаряется. Количество атмосферных осадков, выпавших за гидрологический год, и температура в летний период обуславливают минерализацию поверхностных вод.

Для ставок изучаемой территории подтвердилась естественная геохимическая ассоциация химических элементов (Ba–B–Ag–Sr–Sn), выявленная ранее для подземных вод бассейна р. Бодрак [8, 11]. Наиболее загрязненными оказались водоемы, на водосборной площади которых осуществляется антропогенная деятельность (у трассы в пос. Скалистом, ставки Верхнесадовый и Юркин, расположенные в пос. Прохладном, ставка Мендер – в верховьях Московского оврага). Ставки в верховьях бассейна р. Бодрак балочного типа – наиболее чистые (относительно фоновых значений).

Химический состав исследованных водоемов зависит от ряда факторов – метеоусловий года (температуры приземного воздуха, количества зимне-весенних атмосферных осадков), паводковых вод, геолого-гидрогеологических условий территории, обуславливающих притоки подземных вод, и антропогенных факторов.

При решении специальных водохозяйственных задач необходимо учитывать особенности формирования химического состава пресных вод, употребляемых в хозяйственно-питьевых целях, что придает исследованиям такого рода практическую ценность.

Для оценки качества поверхностных вод Горного Крыма по гидрохимическим показателям в качестве фоновых значений предлагаем использовать химический состав водоемов, расположенных в верхнем течении р. Бодрак.

Авторы благодарят Г.М. Ельцову и Э.М. Правосолова (ЛИГФ СПбГУ) и И.В. Токарева за изменение изотопного состава воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас. Автономная республика Крым / Под ред. Н.В. Багрова. Л.Г. Руденко. Киев; Симферополь: Ин-т географии НАН Украины, 2003. 80 с.
2. Багрова Л.А., Боков В.А., Багров Н.В. География Крыма. Киев: Лыбидь, 2001. 302 с.
3. Барабошкина Т.А., Березкин В.Ю. Эколого-геологическое картографирование бассейна р. Бодрак

- (Крымско-Кавказская горная зона) // LAP Lambert Academic Publishing. 2011. 152 с.
4. Геологическая история Бахчисарайского района Крыма (учебное пособие по Крымской практике) / Под ред. *А.М. Никишина*. М.: Изд-во Московского ун-та, 2006. 60 с.
 5. *Дублянский Ю.В., Климчук А.Б., Амеличев Г.Н., Токарев С.В., Шпётль К.* Изотопный состав атмосферных осадков и карстовых источников северо-западного склона Крымских гор // *Спелеология и карстология*. № 9. Симферополь, 2012. С. 14–21.
 6. *Жук В.О., Ергина Е.И.* Анализ современной метеорологической ситуации в предгорном Крыму // *Уч. зап. Крымского федерального ун-та. География. Геология*. 2018. Т. 4 (70). № 2. С. 227–241.
 7. *Каюкова Е.П.* Гидрохимические особенности атмосферных осадков полигона Крымской геологической практики СПбГУ // *Вестн. СПбГУ. Сер. 7. Геология. География*. 2011. Вып. 2. С. 26–43.
 8. *Каюкова Е.П.* Оценка подземного стока как элемента водного баланса при комплексных гидрогеологических исследованиях (северо-западные склоны Крымских гор). Дис. ... канд. геол.-минералог. наук. СПб.: Санкт-Петербургский горный ун-т, 2018. 186 с.
 9. *Каюкова Е.П.* Формирование изотопного состава природных вод Горного Крыма под влиянием естественных процессов // *Вестн. СПбГУ. Сер. 7. Геология. география*. 2016. Вып. 2. С. 11–26.
 10. *Каюкова Е.П., Чарыкова М.В.* Особенности химического состава подземных и поверхностных вод полигона Крымской учебной практики геологического факультета СПбГУ // *Вестн. СПбГУ. Сер. 7. Геология, география*. 2010. Вып. 3. С. 29–47.
 11. *Каюкова Е.П., Барабошкина Т.А. Филимонова Е.А.* Гидрогеохимические особенности подземных вод бассейна реки Бодрак (Качинское поднятие Горного Крыма) // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология*. 2020. № 4. С. 55–63.
 12. *Каюкова Е.П., Филимонова Е.А.* Качество пресных подземных вод Горного Крыма (долина реки Бодрак) // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4, Геология*. 2022. Номер 1. С. 79–88.
 13. Маршруты Крымской учебной практики по Общей геологии: учебное пособие / Под ред. *Р.В. Веселовского, М.А. Романовского, Н.И. Косевич, А. Гущина*. М.: КДУ, Добросвет, 2021. 215
 14. *Никитин М.Ю., Болотов С.Н.* Геологическое строение Крымского учебного полигона МГУ. Ч. 2. Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 2007. 110 с.
 15. Погода и Климат. Справочно-информационный портал. <http://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения: 4.12.2021)
 16. 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).
 17. Санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”.
 18. *Семенова В.М.* Гидрогеологические условия междуречья Бодрак и Кача // *Очерки геологии Крыма*. Тр. Крымского геол. науч.-уч. центра. М.: Геол. фак. МГУ, 1997. Вып. 1. С. 120–130.
 19. *Токарев И.В., Амеличев Г.Н.* Оценка испарения по данным об изотопном составе воды (2H, 18O) // *Уч. зап. КФУ. География. Геология*. 2020. Т. 6 (72). № 2. С. 294–319.
 20. *Ферронский В.И., Поляков В.А.* Изотопы гидросферы земли. М.: Науч. мир, 2009. 632 с.
 21. *Шварцев С.Л.* Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М.: Недра, 1998. 366 с.
 22. *Шумигина А.Ю., Цыпин М.А. и др.* Эколого-гидрохимический мониторинг природных вод Крымского учебного полигона // *Школа экологической геологии и рационального недропользования*. Материалы конф. СПб., 2006. С. 300–301.
 23. *Юдин В.В.* Геодинамика Крыма. Симферополь: ДИАИПИ, 2011. 336 с.