

УДК 556.5:556.3:551.44

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

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

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

^bИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

*e-mail: tokcrimea@list.ru

Поступила в редакцию 15.03.2024 г.

После доработки 15.03.2024 г.

Принята к публикации 21.05.2024 г.

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

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

DOI: 10.31857/S0321059624060046 EDN: VPCELN

ВВЕДЕНИЕ

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

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

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

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

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

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

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

КАРСТОЛОГО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Пещера Скульская расположена в основании западного склона Ай-Петринского массива, в 1.5 км к востоку от с. Родниковского Орлиновского муниципального округа в составе города федерального значения Севастополя (рис. 1а). Согласно схеме карстологического районирования [2], пещера относится к Западно-Айпетринскому карстовому району Горно-Крымской области.

Скульская пещера заложена в массивных, местами брекчированных известняках верхнего

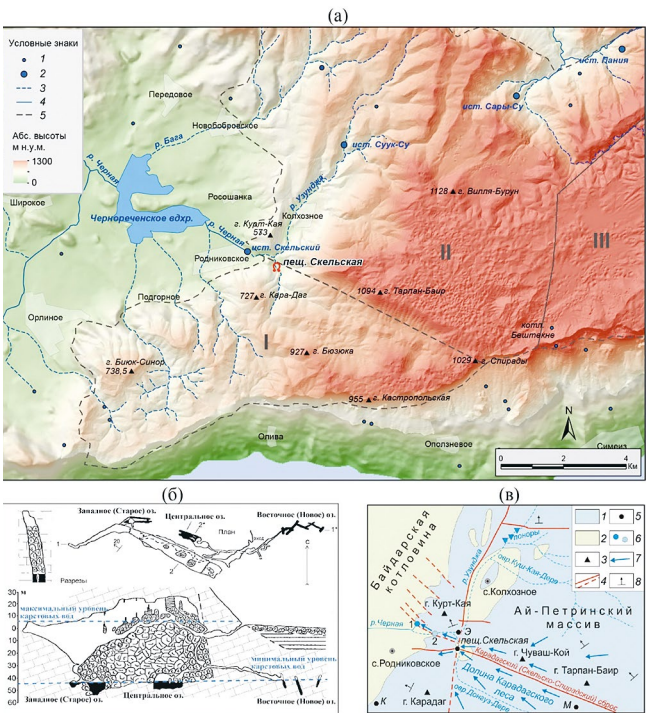


Рис. 1. Расположение, морфология и геологические условия Скульской пещеры: а — орогидрографические условия района расположения исследуемого объекта (1 — мелкие родники, 2 — крупные карстовые источники, водотоки: 3 — временные, 4 — постоянные, 5 — границы карстовых подрайонов: I — Западно-Айпетринский,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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

МЕТОДИКА РАБОТ

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

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

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

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

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

За время работы автономных регистраторов зафиксировано >10 случаев подъемов уровня

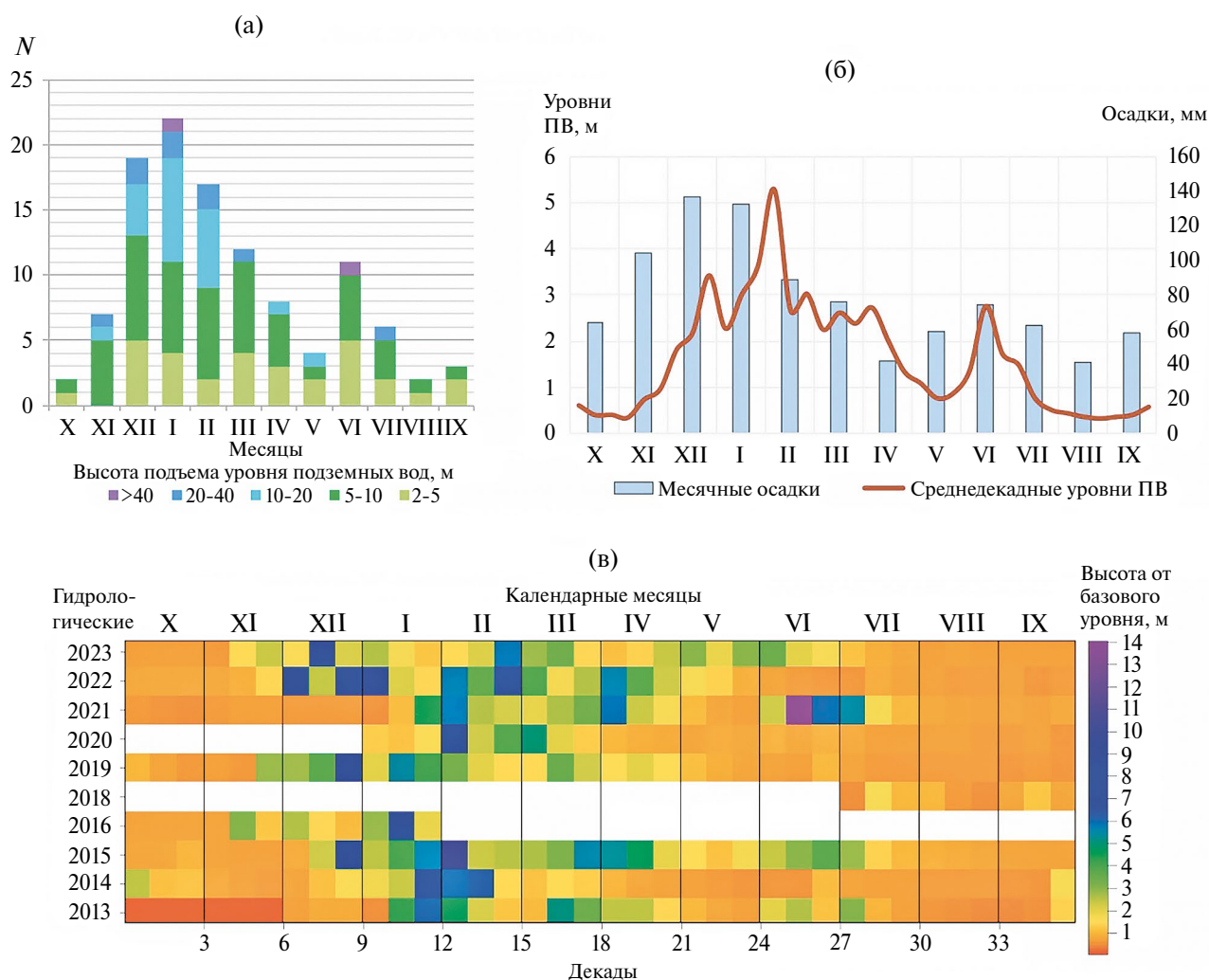


Рис. 2. Характеристики гидрологического режима карстовых вод в Скельской пещере за 2013–2023 гг.: а – распределение паводковых событий разной силы (подъемов уровня карстовых вод разной высоты) по месяцам; б – внутригодовая динамика среднедекадных уровней карстовых подземных вод и среднемесячные суммы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

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

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

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

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

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

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

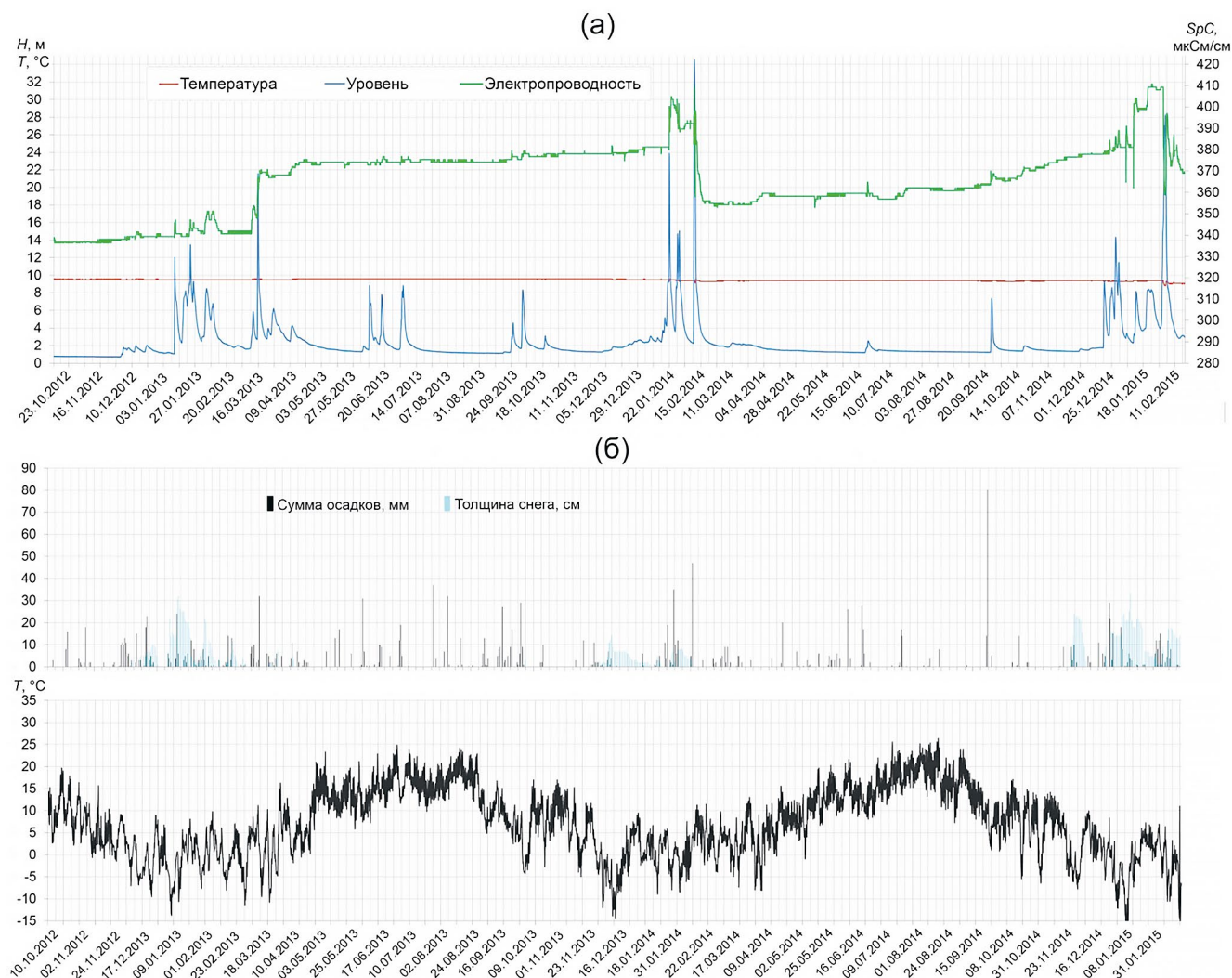


Рис. 3. Динамика основных гидрологических и гидрохимических параметров карстовых вод в Западном озере Скульской пещеры (а) и ход осадков и температуры по м/с Ай-Петри (б) за период с октября 2012 г. по февраль 2015 г.

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

Температурный режим карстовых вод в пещере отличается высокой стабильностью. Фоновая

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

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

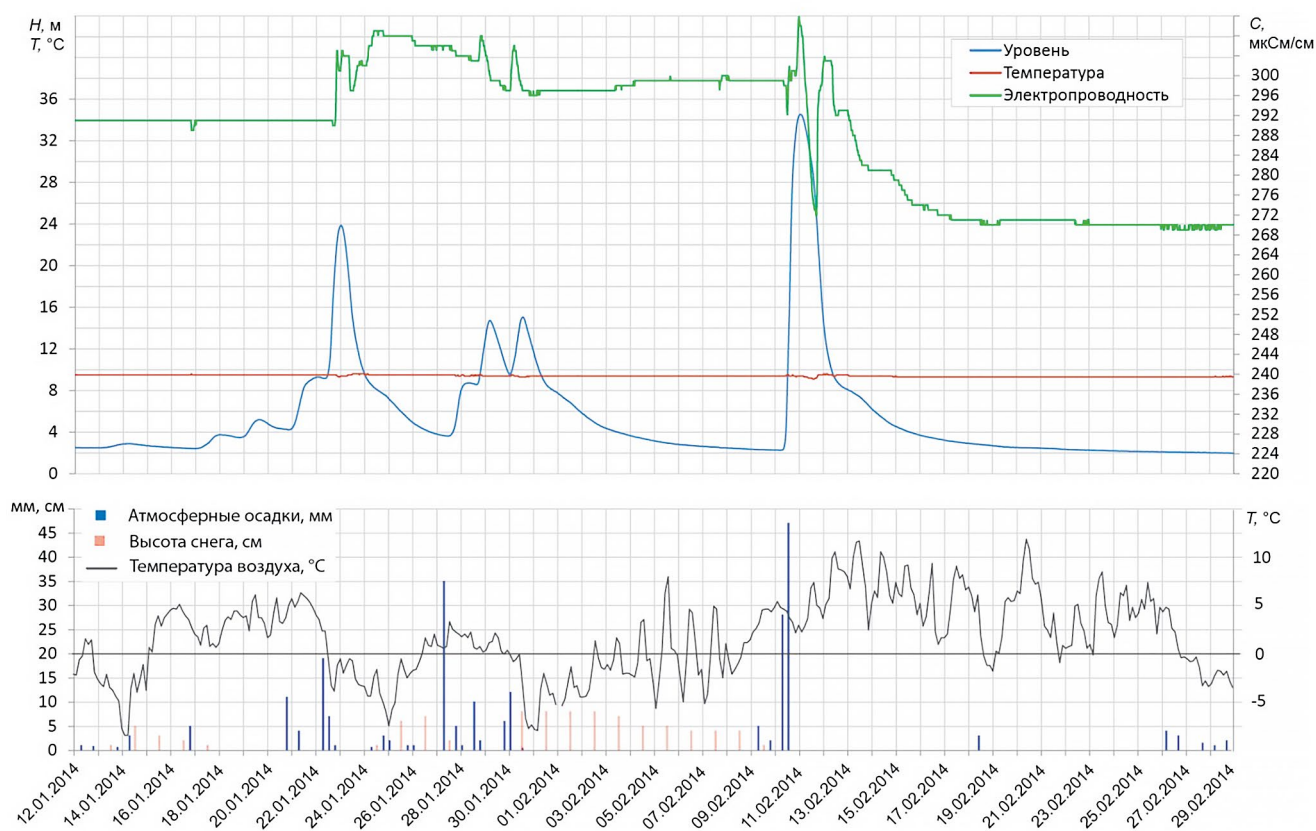


Рис. 4. Динамика основных гидрологических (уровень) и физико-химических (температура, прямая электропроводность) параметров карстовых вод в Западном озере Скельской пещеры (верхняя диаграмма) и ход осадков и температуры по м/с Ай-Петри (нижняя диаграмма) в течение января и февраля 2014 г.

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

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

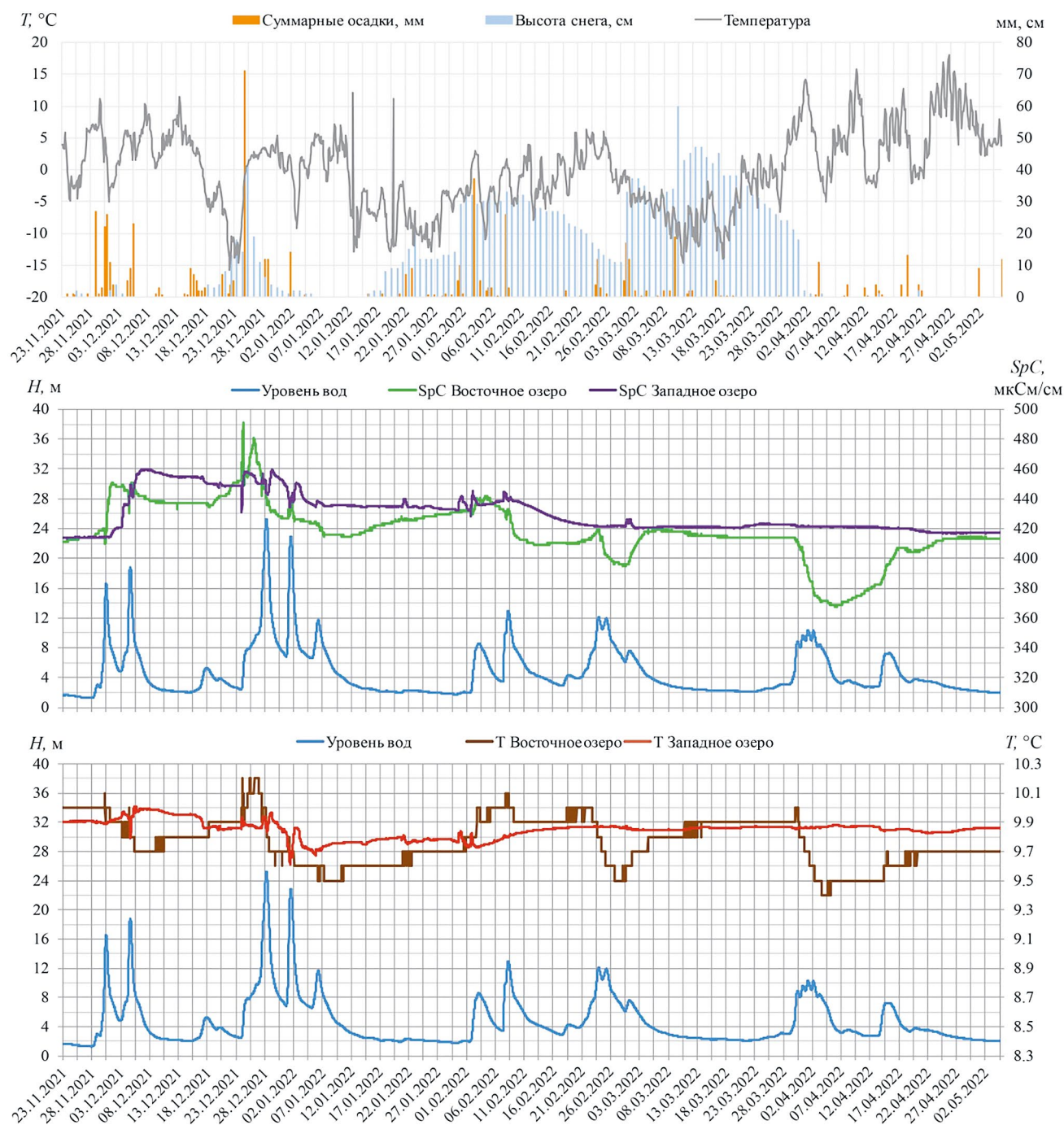


Рис. 5. Записи параллельной серии гидролого-гидрохимических наблюдений в Западном и Восточном озерах Скульской пещеры за зимне-весенний период 2021–2022 гг. Верхняя диаграмма представляет ряд температуры и атмосферных осадков по м/с Ай-Петри. Средняя диаграмма показывает колебания удельной электропроводности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

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

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

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

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

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

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

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

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

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

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

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

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

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

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

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

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

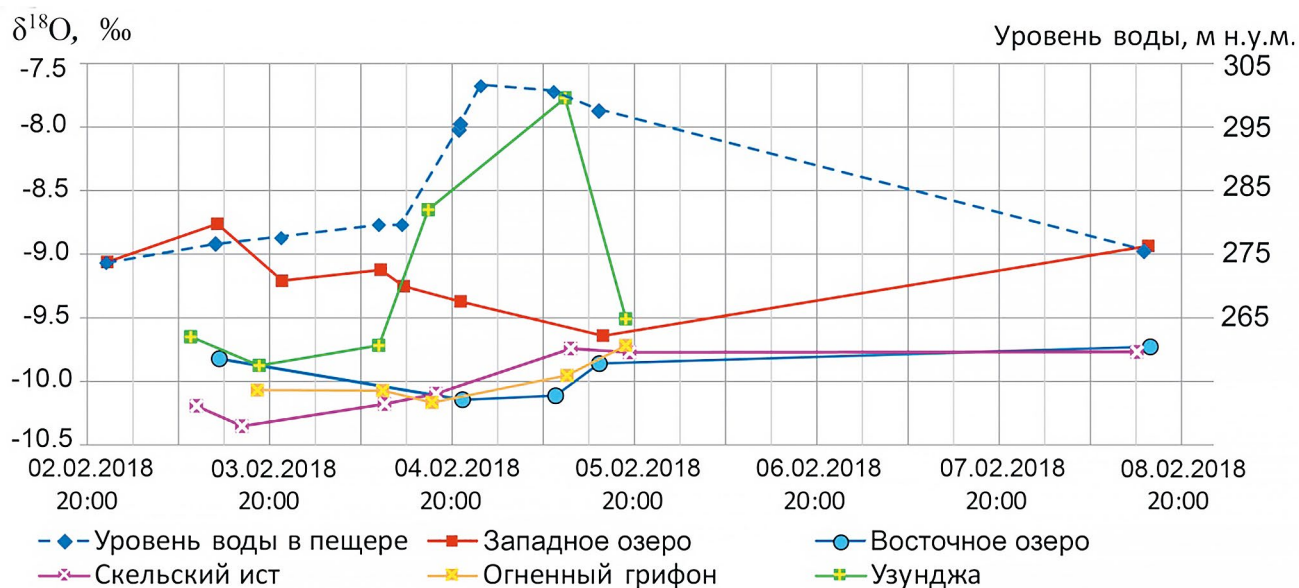


Рис. 6. Динамика содержания $\delta^{18}\text{O}$ в озерах Скульской пещеры и других крупных водопоях (источники Скульский и Огненный грифон, р. Узунджа) ее окрестностей во время паводка в феврале 2018 г.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

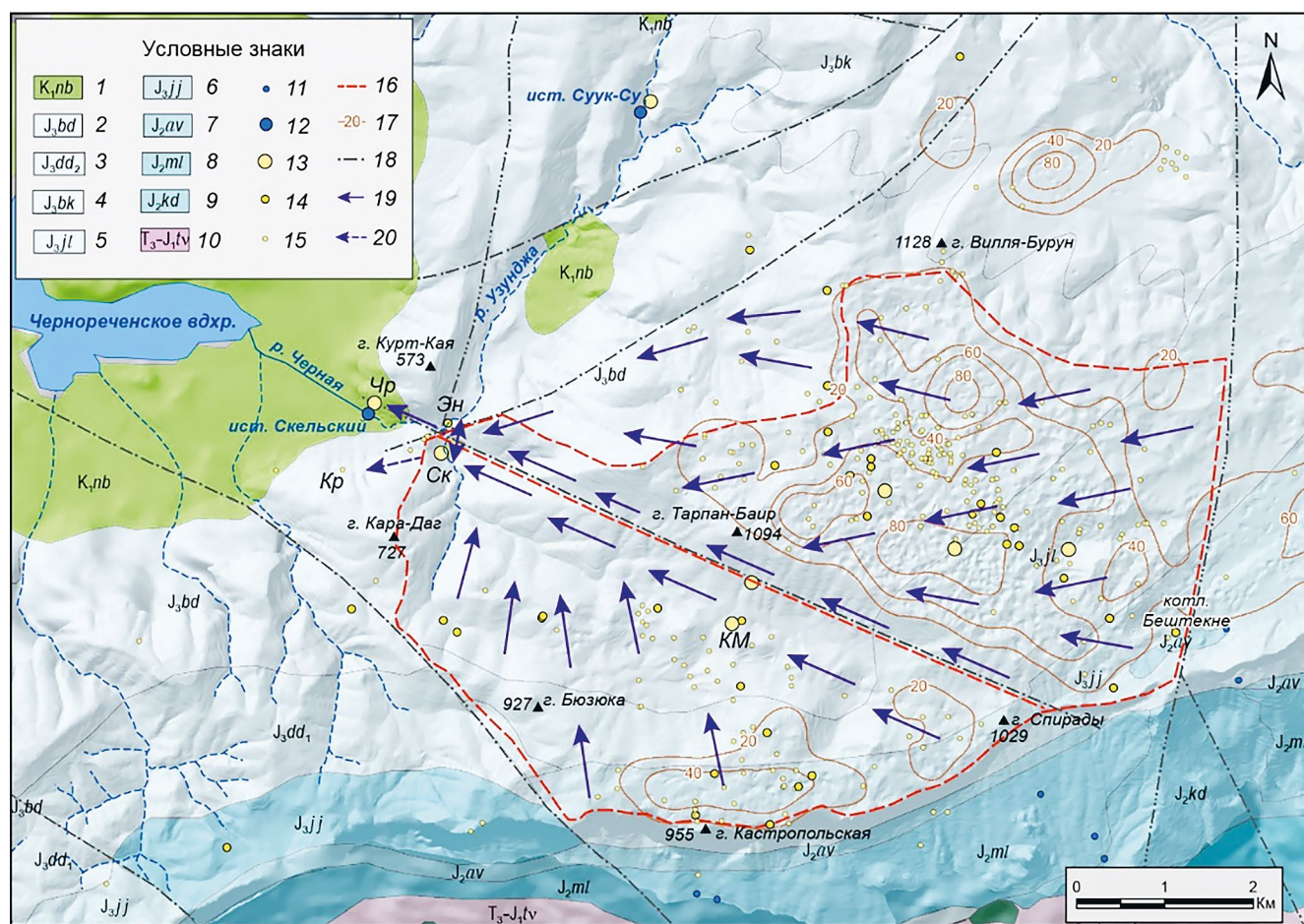


Рис. 7. Схема подземно-карстового стока КВС Скульской пещеры и Скульского источника. Стратиграфические ярусы: 1 — новобобровская толща (глины), 2 — байдарская свита (известняки), 3 — деймендеринская свита (глины, известняки), 4 — беденекырская свита (известняки), 5 — ялтинская свита (известняки), 6 —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

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

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

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

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты многолетнего мониторинга карстовых вод в комплексе с анализом

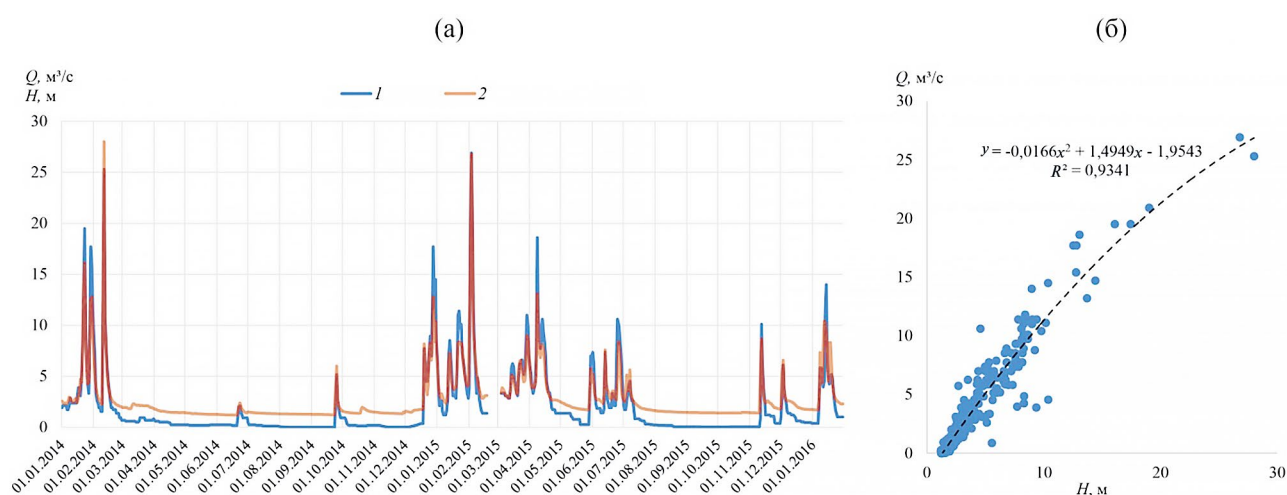


Рис. 8. Диаграммы, показывающие связь расхода Скульского источника (по ГП на р. Черной) с уровнями карстовых вод в Скульской пещере: а – динамика среднесуточных расходов на ГП р. Черной (1) и уровней в Скульской пещере (2) за 2014–2015 гг.; б – зависимость между среднесуточными расходами Q ($\text{м}^3/\text{с}$)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

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

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

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

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

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

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

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

^bWater Problems Institute, Moscow, 119333 Russia

*e-mail: tokcrimea@list.ru

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

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