

РАЗДЕЛ 4.
ГЕОМОРФОЛОГИЯ И ЭВОЛЮЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ.
ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ.
ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 551.44

**ФОРМИРОВАНИЕ И РЕЖИМ КАРСТОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В
БАССЕЙНЕ Р. АБДАЛКА (ПРЕДГОРНЫЙ КРЫМ)**

Амеличев Г. Н.¹, Токарев С. В.¹, Токарев И. В.²

*¹ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»,
г. Симферополь, Российская Федерация;*

*²Научный парк Санкт-Петербургского государственного университета, г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация*

E-mail: lks0324@yandex.ru

Приводятся результаты 5-летнего мониторинга за удельной электропроводностью, минерализацией, температурой и расходом подземных вод в пределах бассейна р. Абдалка в Симферополе. Рассматривается влияние температуры воздуха, атмосферных осадков и мощности снега на формирование запасов вод и их режим. Выделяются три функционально взаимосвязанных элемента карстово-водоносной системы бассейна: области питания, транзита и разгрузки карстовых вод. Для каждой из них описан характер трансформации наблюдаемых параметров, приводятся причины изменения подземных вод. Установлена выразительная гидротермическая меж- и внутригодовая цикличность, пронизывающая подземные воды всех трех областей. Отмечаются существенные различия в формировании режима электропроводности и минерализации для карстовых источников, имеющих сходный термический режим.

Ключевые слова: подземные воды, карстово-водоносная система, подземный сток, питание, транзит, разгрузка, карстовый источник, режим, река Абдалка, Симферополь.

ВВЕДЕНИЕ

Водосборная площадь р. Абдалка, на территории которой проводились мониторинговые исследования, относится к малым речным бассейнам, которые весьма чувствительны к климатическим вариациям и антропогенной нагрузке в силу относительно небольшой «буферной» емкости. В Предгорном Крыму, который отличается высокой закарстованностью и где отсутствуют крупные водотоки, водоснабжение опирается на подземные горизонты, карстовые источники и водохранилища. Для принятия управленческих решений по водному регулированию здесь наиболее рациональным является построение поведенческих прогностических (как правило, математических) моделей указанных объектов, интегрированных, наравне с базами данных, в соответствующие экспертные системы. Нормативный подход к параметрическому наполнению моделей предусматривает ясное

понимание условий и механизмов формирования карстовых вод, определение устойчиво повторяющихся характеристик и состояний функционирования карстово-водоносных систем и проведение водобалансовых наблюдений и расчетов.

Собранные в бассейне р. Абдалка в течение 2014–2018 гг. данные по гидрохимии, термо- и расходомерии карстовых вод и частично опубликованные в литературе [1, 2, 3, 4, 5] требуют обобщения и систематизации, направленных на выявление пространственно-временных закономерностей формирования подземного стока и его режимных характеристик.

1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БАСЕЙНА Р. АБДАЛКА

Бассейн р. Абдалка расположен на восточной окраине г. Симферополь, который, в свою очередь, находится в центре полуострова между Внутренней и Внешней куэстовыми грядами Предгорного Крыма. Река Абдалка дренирует большую часть Свободской куэсты Внутренней гряды. Она является правым притоком р. Малый Салгир и впадает в него на расстоянии 2,1 км от устья последнего. Река имеет протяженность 9 км [6]. Ее истоком до недавнего времени считался мощный карстовый источник Белый ключ (44,994236° с.ш., 34,161916° в.д.), дающий более половины расхода реки. Однако наши наблюдения свидетельствуют, что исток реки находится несколько юго-восточнее, в точке с координатами 44,982317° с.ш., 34,186549° в.д. Это небольшой родник в Каменной балке, которую на топографической карте 1:50000 показывают под названием Край воды.

Границы водосборного бассейна реки проведены преимущественно по водораздельным линиям (рис. 1). Лишь в южной части они проходят по контакту известняков эоцена с глинами, песчаниками и конгломератами нижнего мела. В пределах указанных границ площадь водосбора реки составляет 23,4 км². С юга и запада бассейн Абдалки граничит с бассейном р. Малый Салгир, с севера и востока – с бассейном р. Маленькая. Более детальные морфометрические характеристики приведены в работе [1].

Климатические условия играют ключевую роль в формировании водного и гидрохимического режима всех типов вод бассейна р. Абдалка. На схеме климатического районирования Крыма [7] бассейн реки расположен в пределах восточного предгорного климатического района, который характеризуется полусухим, теплым с мягкой зимой климатом. Эта территория хорошо обеспечена метеоданными, характеристика которых приведена по материалам метеостанции Симферополь, расположенной в 4 км к западу от центра бассейна. Из ее архивных данных следует, что за последние годы, начиная с 2014 г., среднемесячные и среднегодовые показатели метеоэлементов существенно отличаются от представленных в метеорологических справочниках. Например, для наблюдений в Симферополе, охватывающих период за 2014–2018 гг. (рис. 2, а, б), отчетливо фиксируется тенденция снижения показателей, связанных с

ФОРМИРОВАНИЕ И РЕЖИМ КАРСТОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В БАССЕЙНЕ Р. АБДАЛКА (ПРЕДГОРНЫЙ КРЫМ)

увлажненностью (зеленый пунктир). Средняя за этот период величина относительной влажности составляет 72 %, в то время как до 2000 г. она была 74 % [8]. Температурный тренд (красный пунктир) выглядит стабильным, хотя средняя за наблюдаемый период температура воздуха (12,2 °С) значительно выше многолетней нормы (10,1 °С), приведенной в работе [7]. Имеет место слабая тенденция к росту осадков (синий пунктир), которая подтверждается разновременными данными, начиная с прошлого века: 442 мм [9], 501 мм [7], 539 мм [1], 570 мм (данное сообщение). Заметно изменение структуры выпадений, в частности, появление полностью сухих месяцев.

Между среднемесячными значениями температуры воздуха и относительной влажности за 2014–2018 гг. выявлена тесная корреляционная связь ($r = -0,78$).

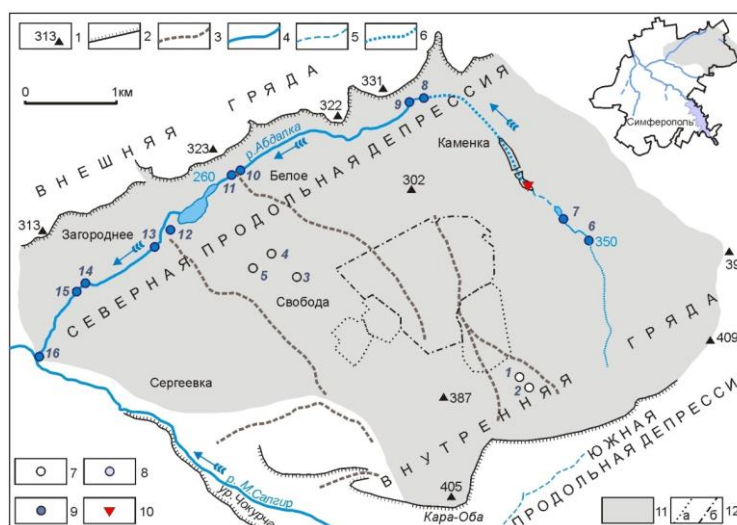


Рис. 1. Местоположение бассейна реки Абдалка в пределах восточной окраины Симферополя.

Орография: 1 – высоты и их абсолютные отметки (м), 2 – обрывы, 3 – балки. Гидрография: 4 – постоянные водотоки, 5 – временные водотоки, 6 – подземное течение р. Абдалка; наблюдательные водопункты: 7 – в области питания (1 – скв. Дон-22, 2 – скв. Дон-56), 8 – в области транзита (3 – кол. НГ, 4 – кол. Там-4, 5 – скв. Там-30), 9 – в области разгрузки (источники: 6 – Исток, 7 – Каптаж, 8 – Верхний ключ, 9 – Белый ключ, 10 – Белый-2, 11 – Белый-1, 12 – Сергеевский, 13 – Малый, 14 – Мостовой, 15 – Ковчег, 16 – Титова); 10 – понор-поглотитель; 11 – площадь речного бассейна; 12 – границы: а – полигонов ТКО, б – лесного массива.

Для дальнейшего анализа влияния увлажнения и температур на формирование внутренних вод бассейна использовались авторские графики, отражающие помесечное распределение метеозлементов в генерализированном годе (рис. 3, а, б).

Самым дождливым считается июнь (98 мм), самым засушливым – август (14 мм). В годовом распределении осадков имеется два максимума – зимний (меньший) и летний (большой). Это говорит о преобладании континентального режима выпадения осадков и проявлении признаков средиземноморского режима, что объяснимо в связи с близостью субтропического Южного бережья.

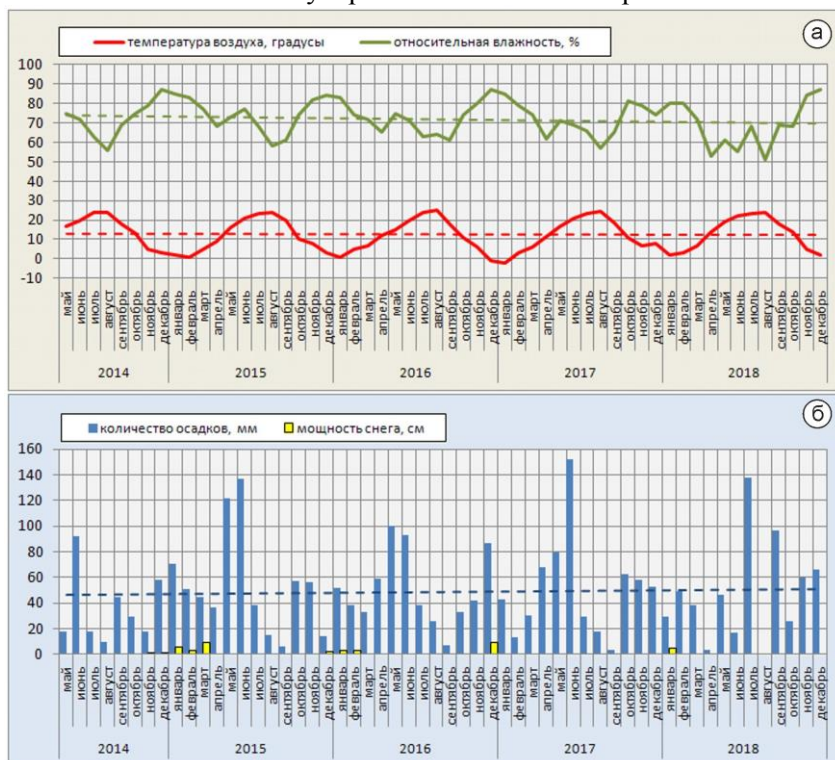


Рис.2. Реальные распределения температуры и относительной влажности воздуха (а), осадков и снегового покрова (б) в бассейне р. Абдалка в течение мая 2014 – декабря 2018 г. (по данным метеостанции Симферополь WMO 33955)

Снежный покров в бассейне р. Абдалка бывает ежегодно, но отличается крайней неустойчивостью. Снег может выпадать и стаять несколько раз за сезон. Склоны куэсты и Северной продольной депрессии покрываются снегом в среднем лишь на 30 % [10]. Его средняя мощность для предгорья 5–10 см [11]. По наблюдениям за 2014 – 2018 гг. она составляет 4 см. Наиболее снежным является март (9 см). Маломощность и неустойчивость снежного покрова не способствует формированию значительных паводков на р. Абдалка в периоды оттепелей.

Важное значение для определения уравниения водного баланса имеет испарение и транспирация. Годовая величина суммарной эвапотранспирации определяется как разность между суммой годовых осадков и средним многолетним стоком. Для

ФОРМИРОВАНИЕ И РЕЖИМ КАРСТОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В БАССЕЙНЕ Р. АБДАЛКА (ПРЕДГОРНЫЙ КРЫМ)

бассейна р. Абдалка эта величина составляет 450 мм [8]. Данные о внутригодовом распределении отсутствуют.

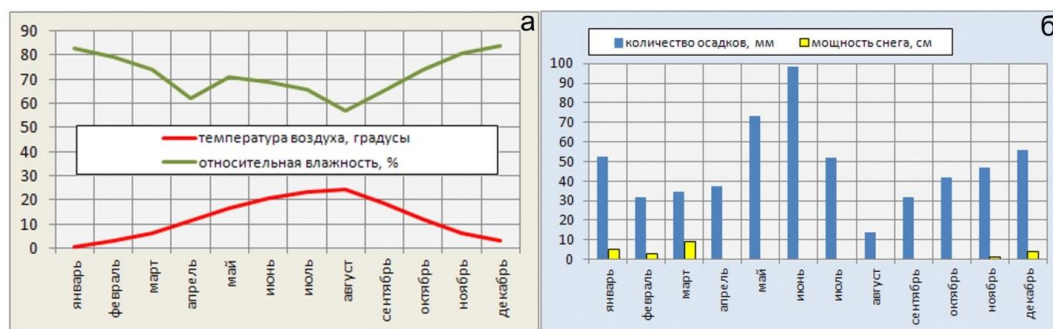


Рис. 3. Генерализованные распределения температуры и относительной влажности воздуха (а), осадков и снегового покрова (б) в бассейне р. Абдалка в течение мая 2014 – декабря 2018 г.

Почвенно-растительный покров в бассейне р. Абдалка испытал существенную техногенную трансформацию. Застройка бассейна и исчезновение естественных ландшафтов в нем происходили поэтапно с наступлением на восток. Наиболее давние поселения были сосредоточены вблизи русел рек М. Салгир (Чокурча) и Абдалка (Старый Абдал, Новый Абдал, Богурча). В середине прошлого века застраиваются микрорайоны Сергеевка, Свобода, расширяется Загороднее [12]. В 80–90 гг. XX в. появляются дачные кооперативы, участки самозахватов, новые промышленные и сельскохозяйственные объекты, которые существенно сокращают площадь естественных ареалов почв и растительности. Процесс деградации естественных угодий сопровождался попытками властей поддержать оптимальный баланс между техногенными и условно-природными ландшафтами. В 60-е гг. XX в. в центральной части бассейна был высажен сосновый лес на площади более 1 км², на структурных склонах куэст проведено террасирование с посадкой хвойных и лиственных деревьев. Эти мероприятия также были направлены на предотвращение развития эрозионных процессов и улучшения водонакопительных свойств почво-грунтов в бассейне.

В настоящее время с учетом этих условно-природных ландшафтов площадь «диких» земель в пределах бассейна Абдалки составляет 25 %. Здесь представлены средней и малой мощности дерново-карбонатные щебенчатые почвы, развивающиеся на известняках эоцена. На них произрастают петрофитные степи. В среднем течении Абдалки на пойменных отложениях получили развитие аллювиальные почвы. На них произрастает луговая растительность. Вовлечение эродированных почв и петрофитных степей в хозяйственное освоение (дачные массивы), усиление водности за счет искусственных поливов, привело к росту водообильности карстовых источников в верховьях реки. Однако в среднем течении

и в низовьях количество подземных вод и их качество в связи с замусориванием и техногенным вмешательством существенно снизились.

2. ОРГАНИЗАЦИЯ КАРСТОВО-ВОДОНОСНЫХ СИСТЕМ

Главным объектом в региональной гидрогеологии являются подземные (в данном случае карстовые) водоносные системы (ПВС или КВС), которые представляют собой обособленный участок земной коры, состоящий из взаимосвязанных водоносных тел, образующих целостную структуру [13]. Структурный анализ ПВС позволяет выделить в ней такие составные элементы как естественные тела (водоносные, спорадически обводненные, сдренированные, водоупорные горизонты) и поля (гидродинамические, гидротермические, гидрохимические). На изучаемом участке Свободской куэсты в качестве естественных тел выступают нижнеэоценовый водоупор, среднеэоценовый и четвертичный водоносные горизонты. Тела организованы в разбитую небольшими разрывами моноклинал, падающую к северу под углами 2–3° и отчасти вскрытую долиной р. Абдалка. В качестве полей выступают пространственно-временные распределения физико-химических параметров (скоростей движения, направлений стока, температур, минерализации, электропроводности воды). В частности, гидродинамическое поле согласно разработкам В.Н. Дублянского [14] представлено тремя вертикальными зонами: нисходящей циркуляции вод, сезонного колебания уровней, полного насыщения. О нем и других полях пойдет речь в следующих разделах.

Основными типами подземных водоносных систем являются бассейны и массивы. Бассейн — это ПВС слоистой структуры с водами преимущественно пластового типа, а массив — ПВС неслоистой структуры с водами преимущественно блокового типа. Кроме того, выделяются переходные типы ПВС: адбассейн, имеющий преобладающую слоистую структуру с участками неслоистой, и адмассив с преобладающей неслоистой структурой с участками слоистой [15]. В соответствии с рекомендациями Г.А. Максимовича [16] бассейны и массивы подземных вод можно классифицировать: по размерам (ничтожные – менее 1 км², очень малые – 1–10, малые – 11–100, небольшие – 101–1000, средние – 1001–10000, большие – более 10 000 км²; по структуре (антиклинальные, синклинальные, моноклиналильные, блоковые); по положению подошвы водопроницаемых пород относительно уровня моря (цокольные, опущенные); по генеральному направлению стока (приморские, континентальные); по типу подземного стока (односторонние, двусторонние, центробежные, центростремительные; продольные, поперечные); по характеру разгрузки (склоновые, долинные, подводные). Комбинация перечисленных признаков, которую можно получить на основании полевого обследования, является «паспортом» любого резервуара подземных вод.

Применяя приведенные выше классификации К.П. Караванова [15] и Г.А. Максимовича [16], изучаемый участок, как резервуар подземных вод, следует отнести к малому адбассейну моноклинално-блоковой структуры с цокольным

положением, континентальным направлением подземного стока продольного типа, имеющему долинную разгрузку.

Длительно существующая устойчивая циркуляция карстовых вод в условиях слоисто-блоковых известняковых структур, каковой является изучаемый участок куэсты, ведет к прогрессивному увеличению проницаемости растворимых пород, изменению динамических и гидрохимических параметров подземного стока, выработке устойчивых режимов функционирования КВС. Согласно В.Н. Дублянскому [13] в каждой КВС можно выделить три функционально взаимосвязанных элемента: 1) область питания – участки, в пределах которых происходит питание водоносных горизонтов за счет инфильтрационных и инфилюационных вод, поступающих с поверхности; 2) область транзита – часть КВС, где карстовые воды движутся в водоносном горизонте преимущественно в горизонтальном направлении к месту своей разгрузки; 3) область разгрузки – участок, на котором осуществляется полный или частичный выход карстовых вод на поверхность. Трехчленное деление КВС правомерно и в вертикальном разрезе.

В данном контексте областью питания будет выступать поверхность и приповерхностная (эпикарстовая) зона, где происходит переход от рассеянного к концентрированному питанию. Областью транзита является зона аэрации (вадозная зона), в пределах которой осуществляется нисходящий сток свободных вод через наиболее проницаемые участки поровых, трещинных и каналовых коллекторов. Областью промежуточной разгрузки выступает водоносный горизонт, соответствующий зоне полного насыщения и замедленной циркуляции подземных вод (фреатической зоне).

Каждый из рассмотренных элементов получил развитие в пределах КВС, расположенной в бассейне р. Абдалка. Рассмотрим их детально.

3. КАРСТОВЫЕ ВОДЫ ОБЛАСТИ ПИТАНИЯ

Формирование карстовых вод в пределах исследуемого участка начинается с выпадающих атмосферных осадков, которые составляют основу преобладающего инфильтрационного питания. Наблюдения за электропроводностью, минерализацией и температурой в основном жидких осадков выполнялись в Симферополе. Величина параметров фиксировалась с помощью кондуктометра ЕС300 фирмы YSI INC. Осадки собирались в модифицированный для полуаридных условий Крыма осадкосборник Хеллманна, водоприемной колбой которого служил термос, а входное отверстие водосборной лейки для предотвращения испарения «запиралось» мячом для пинг-понга. При выведении среднемесячных значений электропроводности, минерализации и температуры выполнялось «взвешивание» через количество осадков, соответствующих периоду между замерами. С мая 2014 по декабрь 2018 г. было сделано 84 замера, из которых получены средние значения

электропроводности $C_1^* = 0,099$ мСм/см ($C_v^{**} = 0,81$), $C_2 = 0,127$ мСм/см ($C_v = 0,72$) минерализации $0,084$ г/л ($C_v = 0,73$) и температуры $13,1$ °С ($C_v = 0,52$). Эти параметры следует рассматривать как стартовые значения, с которых начинается общий ход метаморфизма карстовых вод.

Среди отмеченных показателей яркую сезонную цикличность демонстрирует температура осадков, которая с высокой теснотой взаимосвязи ($r = 0,98$) повторяет ход температуры воздуха. Максимальные значения приходятся на август ($22,5$ °С), минимальные – на январь ($2,5$ °С). Режимы электропроводности и минерализации осадков демонстрируют ослабленную связь с температурой, что свидетельствует о сезонных и межгодовых изменениях в источниках формирования влажности и поступления аэрозолей. Причины высокой вариации этих показателей и неустойчивости режима могут быть объяснены с привлечением материалов изотопного изучения осадков Крыма [17, 18, 19].

Большое влияние на характер и темп трансформации осадков при взаимодействии с поверхностью оказывает наличие/отсутствие почвы или растительности и тип карста в области питания. От бровки Свободской куэсты до середины ее структурного склона развит задернованный карст с мощностью почвенно-элювиального покрова до 30 см. Такой покров особенно летом может полностью задерживать атмосферные осадки, если их интенсивность невелика и они непродолжительны. В верхней части Свободской куэсты развит эпикарстовый горизонт, который также может активно поглощать осадки, перераспределяя их по густой сети мелких приповерхностных трещин и переводя возникающий сток в зону аэрации через глубоко проникающие трещины. Зимой, когда почво-субстрат насыщен водой, а эвапотранспирация имеет низкую величину, инфильтрационная влага активно пополняет среднеэоценовый водоносный горизонт. Летом максимум осадков нивелируется высоким испарением, вегетирующей растительностью и буферной ролью эпикарста. Водоносный горизонт пополняется периодически, лишь во время ливневых осадков, выпадающих на слабо задернованные и обнаженные участки развития карста. Таким образом, характер инфильтрационного питания в течение года может существенно изменяться, что накладывает отпечаток на химический и изотопный состав карстовых вод, их минерализацию и электропроводность.

Наблюдения в скважинах Каменского дачного массива (50 замеров) за инфильтрационными водами, достигшими среднеэоценового водоносного горизонта в верхней части куэстовой гряды, показывает, что их средняя электропроводность составляет $C_1 = 0,442$ мСм/см ($C_v = 0,05$), $C_2 = 0,577$ мСм/см ($C_v = 0,04$), минерализация $0,376$ г/л ($C_v = 0,04$) и температура $12,4$ °С ($C_v = 0,10$). Таким образом, по сравнению с исходной температурой метеорных вод, происходит охлаждение инфильтрационных вод вследствие удаления летней компоненты осадков, сохраняется синхронная поверхности термическая

ФОРМИРОВАНИЕ И РЕЖИМ КАРСТОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В БАССЕЙНЕ Р. АБДАЛКА (ПРЕДГОРНЫЙ КРЫМ)

цикличность, но более чем в 5 раз уменьшается годовой размах между экстремумами.

По данным скважины Донецкая – 22 (далее Дон–22) термическая цикличность с опозданием до 2 месяцев дублируется на графиках электрохимических показателей (рис. 4). Отсутствие информации о расходах воды в скважине не позволяет оценить влияние этого фактора на формирование гидрохимических показателей.

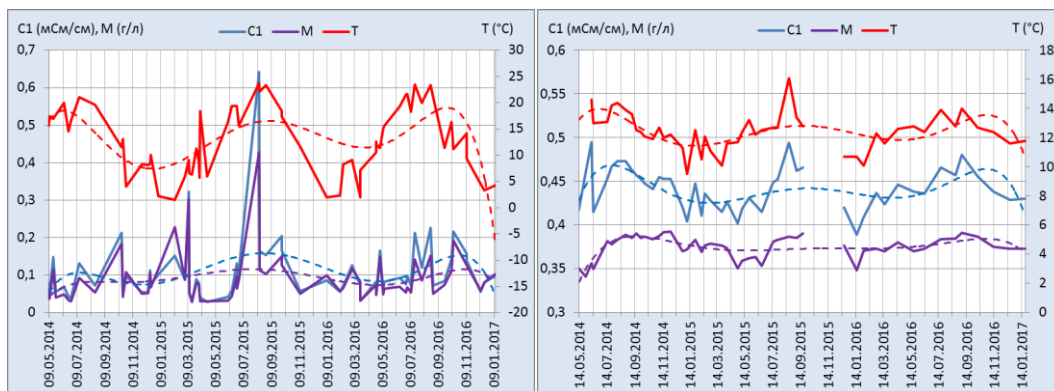


Рис. 4. Режим электропроводности (C_1 , мСм/см), минерализации (M , г/л) и температуры воды (T , °С) атмосферных осадков (левая панель) и скважины Дон–22 (правая панель) в мае 2014 – январе 2017 г.

На графиках генерализованного (за весь период наблюдения) года (рис. 5) также отмечается снижение вариативности всех показателей от осадков к уровню подземных вод. При этом режим электрохимических показателей становится существенно иным, а режим температур остается практически таким же. Теснота корреляционной связи температуры карстовых вод скважины Дон–22 с температурой осадков оценивается коэффициентом 0,95, а с температурой воздуха – значением 0,92. Таким образом, температурный сигнал в области питания КВС является наиболее сильным и менее зависимым в ряду анализируемых показателей.

Учитывая среднюю глубину скважин (25 м) и электрохимические показатели осадков, амплитуда для инфильтрационных вод, пересекающих зону аэрации в верхней части куэсты, достигает по электропроводности $C_1 = 0,343$ мСм/см, $C_2 = 0,45$ мСм/см, по минерализации 0,292 г/л, по температуре 0,7 °С. Предполагая, что эти значения нарастают(+)/убывают(–) пропорционально пути фильтрации, средние вертикальные градиенты на 10 м глубины соответственно составят +0,137 мСм/см, +0,180 мСм/см, +0,117 г/л, –0,28 °С. Из литературных источников [14] известно, что вертикальный градиент минерализации (а, следовательно, и связанный с ним градиент электропроводности) нарастает с глубиной не равномерно, а по убывающей вниз экспоненте. Очевидно, что подобную закономерность следует ожидать и в конкретном случае.

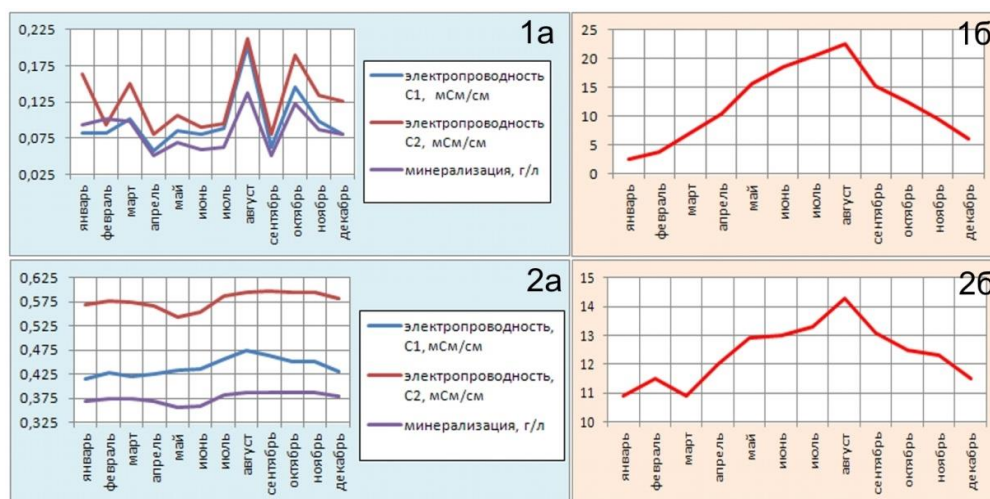


Рис. 5. Генерализованный сезонный режим электрохимических показателей (а) и температуры (б) осадков (1) и вод скважины Дон–22 (2).

Кроме инфильтрационных вод, питание КВС в бассейне р. Абдалка осуществляется за счет инфлюационных вод. Инфлюация – втекание поверхностных (руслowych, озерных и др.) вод через трещины, карстовые каналы и воронки в карстующиеся породы [20]. Это явление наблюдается в верховьях Каменской балки на участке ниже дамбы небольшого ставка – единственного оставшегося из группы четырех имевшихся здесь искусственных водоемов. Все они в течение 70–90-х гг. XX в. утратили свою воду из-за инфильтрационных и инфлюационных утечек. В настоящее время активное инфлюационное питание наблюдается в течение большей части года лишь в районе понора Раков. Оно максимально в осенне-зимне-весеннее время и может исчезать летом в межень. Средний расход поглощаемой воды составляет около 2,6 л/с, электропроводность $C_1 = 0,662$ мСм/см, $C_2 = 0,865$ мСм/см, минерализация 0,561 г/л, температура 12,8 °С. Проведенный весной 2016 г. эксперимент по окрашиванию уходящего в недра потока результатов не дал. Малое количество запущенного флуоресцеина было, вероятно, полностью адсорбировано илистым заполнителем водопроводящих каналов. Тем не менее, синхронный режим понора Раков и источника Верхний ключ позволяет утверждать, что это звенья одной КВС.

Для юго-восточной части бассейна р. Абдалка большое влияние на формирование инфильтрационного стока оказывает антропогенный фактор, связанный с наличием здесь дачных участков. Роль летнего орошения, базирующегося на привозной воде, в области питания невелика, но нарастает вниз по склону куэсты, благодаря развитию здесь более плодородных и мощных почв и появлению централизованного водоснабжения. В 90-х гг. XX века, когда застраивалось приречное левобережье Абдалки в микрорайоне Белое, строителям

приходилось рыть дренажные канавы для отведения в реку подземных вод от фундаментов зданий. Это помогло, но снизило на 2–3 м уровни воды в колодцах вышерасположенных по склону участков [1]. Такая ситуация связана с подпорным влиянием покрова верхнеэоценовых мергелей, снижением фильтрационных свойств среднеэоценовых известняков при погружении под Внешнюю грядку и близостью области разгрузки, в которой осуществляется выход избытка карстовых вод, возникающего по причине первых двух факторов.

4. КАРСТОВЫЕ ВОДЫ ОБЛАСТИ ТРАНЗИТА

Плановые границы области транзита в условиях небольшого количества водопроявлений отбиваются достаточно условно. К этой области относятся средняя и нижняя части северного склона Свободской куэсты. В средней части по-прежнему развит задернованный карст, а в нижней появляется маломощный покров из выветрелых мергелей и мергелистых суглинков верхнего эоцена, что приводит к формированию слабого напора в среднеэоценовом водоносном горизонте. В области транзита увеличивается мощность почвенного покрова, который аккумулирует значительную долю объемов естественной инфильтрации, что компенсируется искусственным поливом на приусадебных участках в вегетационный период. Это отражается в росте минимальных расходов воды карстовых источников в области разгрузки в летнюю межень.

В качестве мониторинговых объектов, характеризующих карстовые воды области транзита, выбраны два колодца и скважина, вскрывающие среднеэоценовый водоносный горизонт в пределах городского микрорайона Свобода (средняя часть северного склона куэсты).

Колодец на перекрестке улиц Нижнегорская и Геническая (далее НГ) был выкопан после Великой Отечественной войны человеком по прозвищу Мефодий. По словам местных жителей в южной стенке у дна колодца есть трещина, по которой поступает вода. В прошлом при чистках колодца ее затыкали тряпками, и приток воды снижался. Глубина колодца 20 м, из которых 16 до уровня воды и 4 м под водой. Диаметр 1,5 м. Стенки колодца выложены бутом в верхней части, а глубже относительно гладкие, пробитые в прочном эоценовом известняке.

В 2014–2018 гг. средняя электропроводность колодезной воды составила $C_1 = 0,739$ мСм/см, $C_2 = 0,948$ мСм/см, минерализация 0,615 г/л, температура 13,4 °С. Вариация всех показателей лежит в пределах $C_v = 0,04–0,06$. Результаты 2,5–годового цикла наблюдений представлены на графиках (рис. 6). Из них видно, что анализируемые показатели имеют ярко выраженную внутригодовую цикличность. Минимальные значения показателей каждого цикла приходятся на зимний, а максимальные – на преимущественно летний период. Нарушение режима, как например, с максимумом минерализации в ноябре 2016 г., может быть связано с задержкой осенних осадков. Отмеченная цикличность сопровождается ежегодным ростом экстремальных значений циклов у всех анализируемых параметров. Восходящие тренды показателей (пунктиры на графиках) свидетельствуют о

прогрессирующей обстановке замедления процессов циркуляции воды, связанной с прекращением водоотбора и постепенным заилением колодца. На формирование электропроводности наибольшее влияние оказывают минерализация ($r = 0,84$) и температура воды ($r = 0,69$).

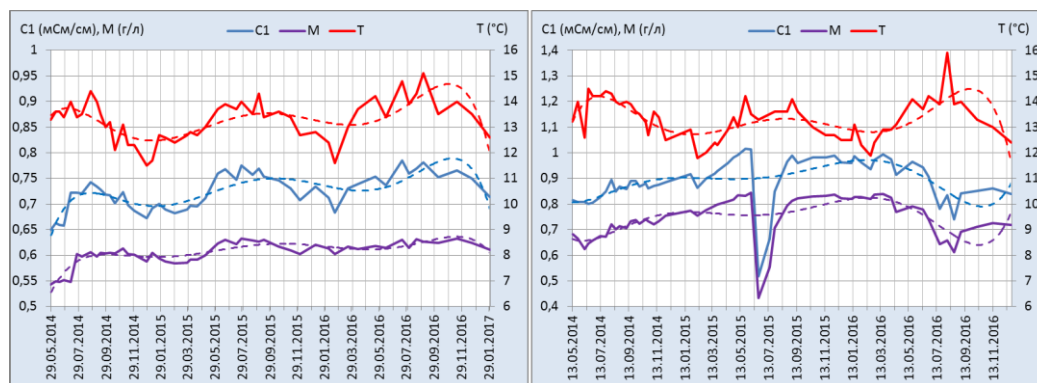


Рис.6. Режим электропроводности (C_1 , мСм/см), минерализации (M , г/л) и температуры воды (T , °С) в колодце на перекрестке ул. Нижнегорская-Геничская (левая панель) и в скважине по ул. Таманская 30 (правая панель)

Скважина по ул. Таманская 30 (далее Там–30) была пробита в 70–х гг. XX века и имеет глубину 35 м. Уровень воды в ней расположен в среднем на глубине 14 м и может колебаться на 1–2 м, в зависимости от сезона года. Примерно такие же глубины имеет большинство скважин в окрестностях, берущих воду из среднеэоценового водоносного горизонта. Это свидетельствует о том, что глубина залегания водонасыщенных пород хорошо выдержана, а их водообильность высока в течение всего года. В то же время при продвижении к области разгрузки уровни воды в колодцах и скважинах начинают приближаться к поверхности. Если в средней части склона куэсты это глубины 14–17 м, то в нижней части – 1–2 м.

Для скважины Там–30 средние значения электропроводности составили $C_1 = 0,878$ мСм/см, $C_2 = 1,129$ мСм/см, минерализации 0,733 г/л, температуры воды 13,3 °С. Изменчивость показателей невысокая ($C_v = 0,06–0,12$).

Графики электропроводности и минерализации (рис. 6) демонстрируют идентичный ход значений в течение всего периода наблюдений. Их анализ выявляет слабо выраженную годовую цикличность с максимумами, приходящимися на весну и минимумами, соответствующими летнему периоду. Наблюдается глубокий минимум в июне 2015 г., связанный с мощным подземным паводком, прошедшим в результате выпадения двухмесячной нормы осадков. Майские осадки способствовали вытеснению "старых" высокоминерализованных, а, следовательно, и высоко электропроводных вод, что на графике отражается абсолютным максимумом за весь период наблюдений. В июне следует увеличение расходов

карстовых источников в долине р. Абдалка, последовавшее с 1–2-недельным опозданием, вследствие добегания паводковой волны от области питания к области разгрузки. Восстановление нарушенных паводком параметров произошло в течение двух месяцев.

Температурный график показывает более яркую сезонную цикличность. Однако она находится в противофазе с цикличностью электропроводности ($r = -0,25$) и минерализации ($r = -0,40$), что говорит о слабом влиянии температуры как контролирующего фактора. Об этом свидетельствует и анализ летних температур 2015 г., который не выявляет глубокой июньской депрессии. Лишь небольшое снижение температуры вод в этот период говорит о том, что через зону транзита вытеснялись воды, пришедшие из более прохладной области питания. Таким образом, решающим фактором в формировании электрохимического режима карстовых вод в скважине Там–30 является количество и режим выпадающих атмосферных осадков в области питания.

Между температурой карстовых вод колодца (НГ) и скважины (Там–30) выявлен относительно высокий коэффициент корреляции ($r = 0,69$), что указывает на единый режим этих вод и принадлежность к среднеэоценовому водоносному горизонту.

Колодец по улице Таманской 4 (далее Там–4) имеет глубину 19 м и диаметр 1 м. Столб воды стоит на отметке 17 м от устья. Последние 15 лет вода используется только для технических нужд, так как колодец давно не чистился, и вода имеет низкое качество. Относительно высокая минерализация 0,906 г/л и электропроводность ($C_1 = 1,076$ мСм/см, $C_2 = 1,385$ мСм/см), а также низкая вариативность ($C_v = 0,03–0,04$) по всем параметрам указывают на затрудненный водообмен. Полуторагодичный (2014–2015 гг.) мониторинг позволил выявить слабую сезонную цикличность электропроводности и минерализации, асинхронную в пределах 1–2 месяцев с цикличностью температуры воды. В режиме последней наблюдается хорошо выраженный максимум в июле–сентябре и минимум в декабре–январе (среднее значение 13,2°C). Отсутствие температурной реакции на обильные летние осадки 2015 г. указывает на то, что инфильтрационные воды, дошедшие сюда из области питания, продолжали прогреваться за счет теплых (около 18 °C) осадков. Реакция на июньские ливни 2015 г. сказалась минимумом электропроводности и минерализации лишь в июле. Всё это указывает на затрудненную циркуляцию карстовых вод на объекте.

Графики генерализированного режима электропроводности и минерализации водопунктов области транзита (рис. 7) демонстрируют пеструю картину во внутригодовом распределении значений. Использование статистических методов анализа данных позволило выявить сходство условий формирования электропроводности и минерализации в водах колодцев НГ и Там–4. В распределении температуры воды всех трех пунктов наблюдения фиксируется один механизм контроля, связанный с температурой воздуха на поверхности и температурой осадков.

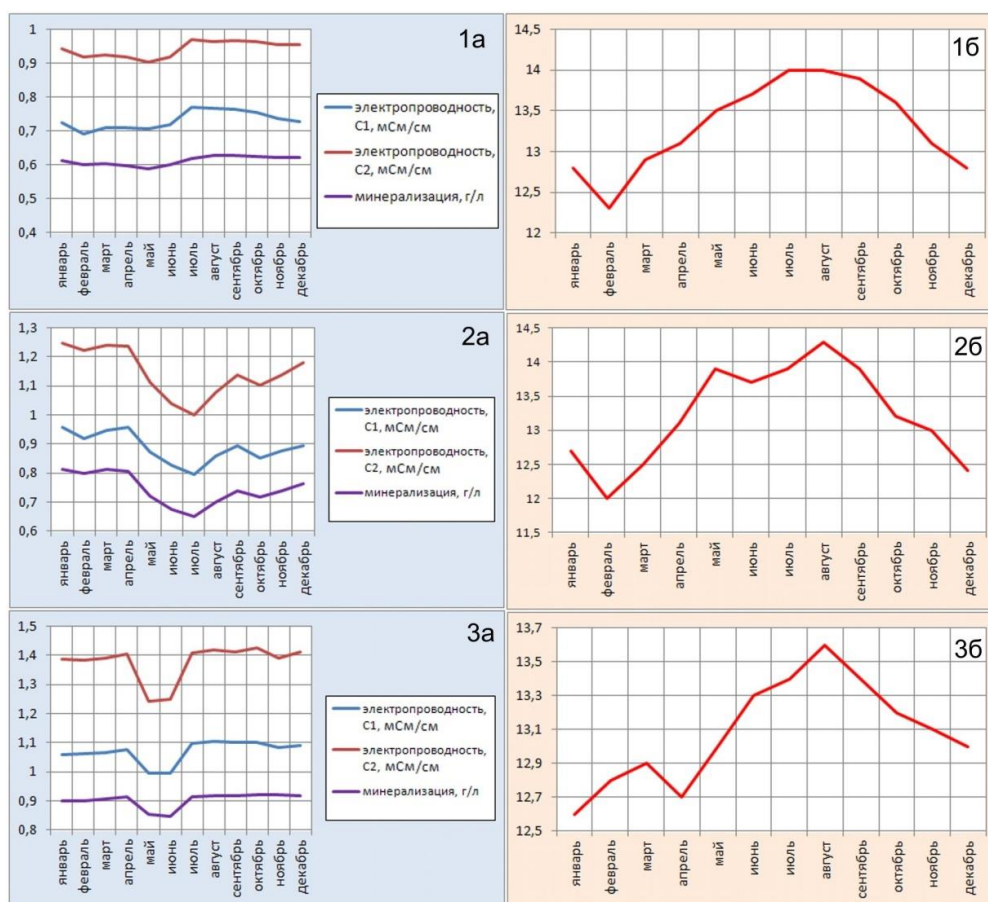


Рис. 7. Осредненный за период наблюдений сезонный режим электрохимических показателей (а) и температуры (б) вод колодца НГ (1), скважины Там–30 (2) и колодца Там–4 (3).

Таким образом, средние значения электрохимических параметров для области транзита составили: электропроводность $C_1 = 0,898$ мСм/см, $C_2 = 1,154$ мСм/см, минерализация 0,751 г/л и температура карстовых вод 13,3 °C.

В заключении приведем вертикальные градиенты электропроводности, минерализации и температуры, предполагая, что часть питания в зоне транзита подземные воды получают за счет атмосферных осадков, а средняя глубина водоносного горизонта составляет 15 м (табл.1). Горизонтальные градиенты рассчитаны как отношение разности средних значений показателей в области транзита и в области питания к расстоянию между их условными центрами (3 км).

**ФОРМИРОВАНИЕ И РЕЖИМ КАРСТОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В
БАССЕЙНЕ Р. АБДАЛКА (ПРЕДГОРНЫЙ КРЫМ)**

Таблица 1

Вертикальные и горизонтальные градиенты электрохимических показателей
подземных вод в области транзита КВС в бассейне р. Абдалка

Показатель	Вертикальный градиент, ед.изм./10 м	Горизонтальный градиент, ед.изм./100 м
Электропроводность, C_1 , мСм/см	+0,533	+0,015
Электропроводность, C_2 , мСм/см	+0,703	+0,019
Минерализация, г/л	+0,447	+0,013
Температура, °C	+0,13	+0,03

Примечание: плюс – прирост показателя; минус – убыль.

Все показатели демонстрируют прирост значений. Вертикальные градиенты электропроводности и минерализации, рассчитанные как равномерно нарастающие, реально увеличиваются с экспоненциальным замедлением в глубину. В области транзита отмечается устойчивый прогрев вод, в отличие от области питания, где наблюдается падение температуры воды с глубиной вследствие краевого положения области и высокой природной вентиляции пород у бровки куэсты.

5. КАРСТОВЫЕ ВОДЫ ОБЛАСТИ РАЗГРУЗКИ

Разгрузка карстовых вод, стекающих по моноклинали северного склона Свободской куэсты, происходит в Северной продольной депрессии, в долине р. Абдалка, непосредственно в русле или на пойме реки. Согласно теоретическим представлениям [13] такой тип разгрузки называется наземным, а подтип – долинным. По характеру выходов воды на участке выделяются нисходящие (большинство) и восходящие (Белый ключ) источники.

Гидрогеологические условия разгрузки карстовых вод Свободской куэсты и обстановка выходов основных родников в долине частично описаны в работе, посвященной гидрологии р. Абдалка [1]. Разгрузка связана с эрозионным вскрытием верхнеэоценовой покрывки из мергелей и кровли среднеэоценовых известняков, включающих одновозрастный водоносный горизонт. Поскольку на этом участке подземные воды начинают приобретать напор, отдельные очаги разгрузки имеют восходящий характер движения карстовых вод, усиленную подпитку четвертичного аллювиального горизонта (ист. Белый ключ). В настоящее время в русле р. Абдалка разгружается 11 карстовых источников, на каждом из которых в течение 2014–2018 гг. проводились наблюдения за электропроводностью, минерализацией и температурой вод и выполнялись расходометрические работы. Замеры

осуществлялись с периодичностью 1–3 раза в месяц, преимущественно в дневное время.

При анализе размещения карстовых источников обращает на себя внимание их парное расположение у русла реки. Установлено, что в верховьях долины родники Исток и Каптаж, Верхний ключ и Белый ключ, а также группа родников Титова возле устья Абдалки, связаны с геоморфологическими аномалиями тектонической природы [1]. Пары родников Белый–1 и 2, Сергеевский и Малый в среднем течении, а также Мостовой и Ковчег в нижнем течении, приурочены к устьям крупных в прошлом балок, которые ныне почти не выражаются в рельефе вследствие активной хозяйственной перепланировки территории. Это указывает на то, что балки по-прежнему продолжают играть важную гидрогеологическую роль, связанную с распределением подземного стока. К ним стягиваются и вдоль них стекают подземные потоки вод до выхода на поверхность. Свойства вод, а также их гидрохимический режим в парных источниках очень близкие (кроме пары Мостовой-Ковчег).

Ниже приводится характеристика карстовых источников области разгрузки. Двум парам родников Исток и Каптаж, Верхний ключ и Белый ключ, расположенным в истоке р. Абдалка были посвящены отдельные детальные работы [4, 5], поэтому в данном сообщении они не рассматриваются.

Источник Белый–1 располагается на левобережье р. Абдалка по ул. Сакской 11 во дворе частного домовладения, где устроен садок для содержания и разведения рыбы. В 70–80-х гг. до застройки левобережья Абдалки здесь была большая копаная воронка, из которой бил ключ. Местные жители набирали воду для питьевых нужд, несмотря на то, что она давала обильную накипь в чайниках (высокая карбонатная жесткость). Теперь вода вытекает в реку под дорогой через цементную трубу большого диаметра. Иногда летом, когда сток уменьшается, чувствуется легкий запах сероводорода. За 2014–2018 гг. средние значения составили: электропроводность $C_1 = 0,996$ мСм/см, $C_2 = 1,274$ мСм/см, минерализация 0,835 г/л, температура 13,2 °С (все $C_v = 0,03–0,06$), расход 10,7 л/с ($C_v = 0,59$).

Источник Белый–2 находится на правобережье Абдалки в 50 м от мостика через реку у перекрестка улиц Сакская и Белая на высоте 265 м в.у.м. Его каптаж оборудован бетонным колодезным кольцом с железной крышкой. Вода выходит мощной струей и 2–3 м протекает по устроенному лотку, после чего рукавом впадает в Абдалку. Максимальный расход может превышать 30 л/с, при этом вода переливается через лоток. Средняя электропроводность $C_1 = 0,950$ мСм/см, $C_2 = 1,237$ мСм/см, минерализация 0,804 г/л, температура 12,8 °С (все $C_v = 0,03–0,04$), расход 11 л/с ($C_v = 1,00$).

Оба родника располагаются в устье небольшой (менее 3 км длиной) маловыразительной в рельефе балки, берущей начало у полигона бытовых отходов к северу от абсолютной отметки 387 м (рис.1). В наиболее дождливые годы балка может временно обводняться в среднем и нижнем течении.

Анализ электропроводности, минерализации и температуры воды в источниках Белый–1 и 2 выявляет высокую степень сходства режимов ($r = 0,61–0,63$), кроме

расходов ($r = 0,20$). Эту особенность подтверждают и многолетние тренды (пунктиры на графиках). На всех графиках (рис. 8) фиксируется выразительная сезонная цикличность, более контрастная у источника Белый–1 и менее амплитудная у источника Белый–2. Минимальные температуры воды в обоих источниках приходятся на январь и колеблются от 11 до 12 °С. Максимальные значения наблюдаются в июне-июле или сентябре и достигают у источника Белый–1 14,5–15,0 °С, а у источника Белый–2 14,0–14,5 °С. Циклы электропроводности и минерализации источника Белый–1 могут быть асинхронны с температурой на 1–2 месяца. У источника Белый–2 асинхронность с температурой с 2016 г. увеличивается вплоть до состояния противофазы. Возможно, такое состояние связано с растущим в последние годы подтоком речных вод из-за заиления русла. В этом отношении режим электрохимических показателей источника Белый–2 очень близок режиму источника Белый ключ. Сравнительно высокая электропроводность родников Белый–1 и 2 также как и Белого ключа объясняется поступлением в них карстовых вод из областей питания в районе бывших полигонов бытовых отходов. После закрытия свалок фиксируются устойчивые тренды к снижению электропроводности и минерализации. Также характерны растущие тренды температуры воды на фоне нисходящих тенденций по расходу (рис. 8).

Анализ гидрографа источника Белый–1 указывает на высокую тесноту взаимосвязи с гидротермической кривой. Особенно ярко связь температуры и дебита разгружающихся вод проявилась в водообильный 2015 г. В менее водные последующие годы наблюдается асинхронность летних максимумов расхода и температуры воды до 1 месяца. Таким образом, синхронный отклик температуры на расход характерен для ситуации, когда питающая система имеет высокую степень наполненности внутренних резервуаров. Сработанность динамических запасов в системе приводит к задержке температурного сигнала на срок тем больший, чем меньше заполнена система. Максимум расхода источника Белый–1 в июне-июле 2015 г. хорошо согласуется с синхронными глубокими минимумами минерализации и электропроводности в скважине Там–30 (рис. 6), когда через среднеэоценовый водоносный горизонт проходили низко минерализованные и слабо проводящие ток воды июньских ливней. Это доказывает, что в периоды высокой водности скорости подземных потоков увеличиваются в несколько раз за счет уменьшения длины пути фильтрации.

Гидрограф источника Белый–2 не обнаруживает аналогичной источнику Белый–1 связи с гидротермической кривой. Водообильное начало лета 2015 г. привело к подтоплению его каптажа и невозможности замеров расхода в течение некоторого времени. Анализ расходов источника Белый–2 и Белый–1 свидетельствует о существенных различиях в водном режиме, несмотря на общий нисходящий характер тренда. В то же время у них имеются черты сходства в распределении абсолютных пиков минерализации и электропроводности. Это позволяет предположить, что источник Белый–2 является дериватом обводненного нарушения, контролирующего положение обоих источников. Его разгрузка

осуществляется в аллювиальные отложения р. Абдалка, а истинное распределение электропроводности и минерализации «маскируется» гидрохимией речных вод.

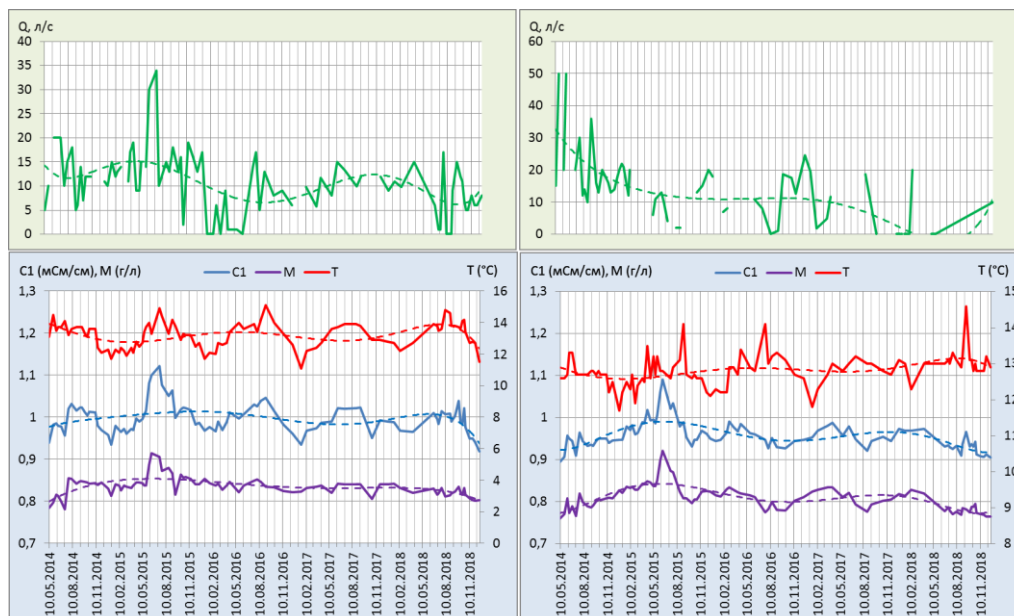


Рис.8. Режим расхода (Q , л/с), температуры (T , °C), электропроводности (C_1 , мСм/см) и минерализации (M , г/л) воды источников Белый-1 (левые панели) и Белый-2 (правые панели).

Источники *Сергеевский* и *Малый* составляют еще одну пару расположенных на расстоянии 180 м друг от друга водопроявлений у русла р. Абдалка. Первый из них, расположенный на абсолютной отметке 261 м в.у.м. выходит под обрывистым берегом старого ныне высохшего и заросшего камышом ставка. Его каптаж представляет собой бетонное колодезное кольцо с прорезью, из которой вода наполняет небольшой округлый, облицованный плитками бассейн. Далее слабым ручейком длиной в несколько десятков метров, пройдя по дну высохшего ставка, она попадает в р. Абдалка. Источник имеет средние значения электропроводности $C_1 = 0,836$ мСм/см ($C_v = 0,09$), $C_2 = 1,083$ мСм/см ($C_v = 0,08$), минерализации 0,705 г/л ($C_v = 0,08$), температуры 13,2 °C ($C_v = 0,14$) и расхода 1,3 л/с ($C_v = 1,08$).

Источник *Малый* находится на абсолютной отметке 258 м в.у.м. рядом с дамбой высохшего ставка. Его каптаж состоит из асбесто-цементной трубы диаметром 36 см, из которой вытекает вода, и приемного бетонного лотка длиной 2,5 м, по которому вода стекает в реку. Средняя электропроводность воды составляет $C_1 = 0,769$ мСм/см ($C_v = 0,11$), $C_2 = 0,984$ мСм/см ($C_v = 0,10$),

ФОРМИРОВАНИЕ И РЕЖИМ КАРСТОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В БАССЕЙНЕ Р. АБДАЛКА (ПРЕДГОРНЫЙ КРЫМ)

минерализация 0,639 г/л ($C_v = 0,10$), температура 13,5 °C ($C_v = 0,07$), расход 7 л/с ($C_v = 0,99$).

Оба источника находятся в устьевой части балки, берущей начало в средней части структурного склона Свободской куэсты на высоте около 340 м. За время многочисленных перепланировок территории она практически не выделяется в рельефе, но во время обильных дождей на ее месте по поверхности формируется временный водоток, который подтапливает хозяйственные объекты. Последние крупные антропогенные изменения в пределах балки произошли при строительстве Ялтинской обьездной дороги. Балка была перекрыта дорожной насыпью в районе проспекта Победы. В результате паводковый сток часто скапливается у кольцевой развязки пр. Победы–Ялтинская обьездная, подтапливая автодорогу. После строительства обьездной дороги, по словам местных жителей, расходы обоих источников сократились более чем в 2 раза. Тем не менее, в трещинной зоне, контролирующей заложение балки, хоть и ограниченно, но продолжают циркулировать подземные воды.

Анализ расходов источников Сергеевский и Малый (рис. 9) показывает их схожую и высокую ($C_v = 1,08–0,99$) вариабельность за весь период наблюдений. Отмечается значительное снижение дебитов источника Сергеевский и рост водности источника Малый (тренды). Такое состояние сформировалось после обильных летних ливней 2015 г., когда после заметного отклика на высокий пик июньских осадков в источнике Сергеевский произошло уменьшение пропускной способности его подводящих каналов. Кольматаж каптажа сопровождался затрудненной разгрузкой, цветением вод, общим ростом минерализации и электропроводности, увеличением годовой амплитуды температуры воды.

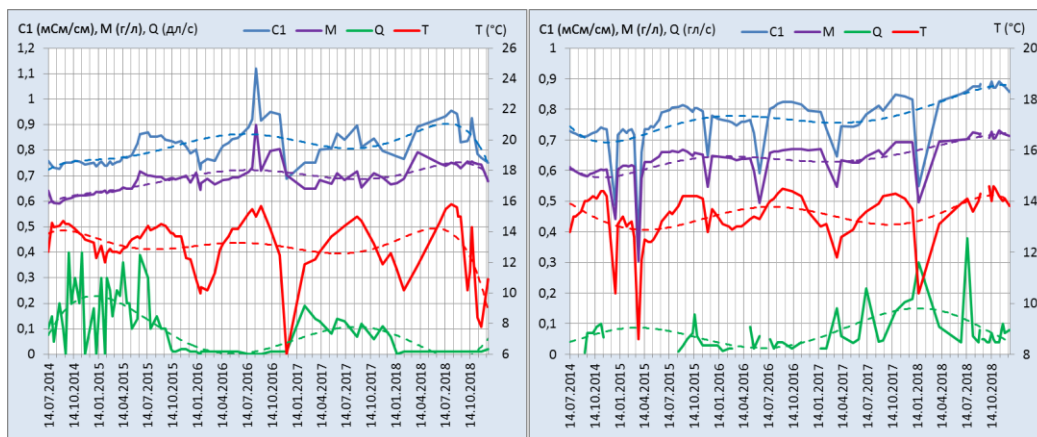


Рис. 9. Режим электропроводности (C_1 , мСм/см), минерализации (М, г/л), температуры (Т, °C) и расхода (Q, дл/с, гл/с) воды родников Сергеевский (левая панель) и Малый (правая панель).

В 2017 г. оба родника были почищены, но для источника Сергеевский восстановление водности носило временный характер. Очевидно внутренние изменения питающей системы, произошедшие летом 2015 г., привели к переориентации подземных потоков в сторону источника Малый. Такая перестройка основного пути движения подземных вод вдоль зоны трещиноватости является характерной для карстовых систем в период паводков. Тем более следует учитывать более низкое положение в рельефе источника Малый.

При анализе месячных расходов источника Малый в генерализированном за период наблюдения году выявляется высокое соответствие паводковых пиков летнему и зимнему максимуму осадков и таянию максимальных запасов снега в марте. Зимний и мартовский максимумы дебитов сопровождаются соответствующими понижениями температуры воды.

Температурные кривые обоих источников (рис. 9) демонстрируют выраженную сезонную цикличность с максимумами в августе (Сергеевский) и сентябре-октябре (Малый) и минимумами в январе-феврале (Сергеевский) и январе или марте (Малый). Мартовские минимумы связаны исключительно с холодными талыми водами. Несовпадение периодов экстремальных температур у источников, находящихся в одинаковых гидрогеологических условиях, связано с их различной водностью. Малые дебиты источника Сергеевский приводят к быстрому остыванию вод, начиная с конца августа. В источнике Малый большие объемы прогретых за лето вод начинают остывать лишь в сентябре-октябре. Такая же ситуация наблюдается с минимальными температурами, особенно в источнике Сергеевский. Пока в нем расходы держались на уровне 1–2 л/с, минимумы температуры фиксировались в феврале. Как только его дебит снизился и стабилизировался на уровне 0,1 л/с, минимальные значения температуры стали появляться в декабре-январе. Для источника Сергеевский наблюдается нисходящая цикличность температуры на фоне быстро падающих дебитов. Для источника Малый отмечается растущая цикличность температур на фоне увеличивающихся дебитов.

Для электропроводности и минерализации обоих источников в течение всего периода наблюдений характерен скачкообразный рост значений с выделением заметной сезонной цикличности, повторяющей фазы температуры (рис. 9). Если для источника Сергеевский рост электрохимических показателей может быть объяснен падением расхода, то для источника Малый, расходы которого увеличиваются, он вероятно связан с растущим антропогенным загрязнением. Максимумы значений электропроводности и минерализации источника Сергеевский приходятся преимущественно на конец летнего периода (добегание трансформированных июньских осадков), минимумы – на январь (поступление осенне-зимних осадков), иногда март (таяние снега). Пики электрохимических показателей летом опаздывают по отношению к пикам осадков на 1–2 месяца из-за слабой обводненности КВС, а депрессии зимой и весной – фактически синхронны с поступающими дождями и талыми водами вследствие высокого наполнения системы.

ФОРМИРОВАНИЕ И РЕЖИМ КАРСТОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В БАССЕЙНЕ Р. АБДАЛКА (ПРЕДГОРНЫЙ КРЫМ)

Для источника Малый характерно примерно такое же распределение экстремумов, но только с большим смещением пиков на август-октябрь, а депрессий – на декабрь-январь (поступление осенне-зимних осадков) или март (таяние снега). Зимне-весенние депрессии тесно коррелируются с минимумами температур воды, что подчеркивает большую роль в питании родника зимних вод.

Расхождение в цикличности электрохимических показателей обоих источников может быть связано не только с различиями их обводненности, но и с морфологией питающих каналов, емкостными свойствами карстовых резервуаров, разным характером антропогенного влияния.

Источник Мостовой (Поворот) располагается на правом берегу р. Абдалка у моста в месте ее пересечения с улицей Кечкеметская. Здесь на абсолютной отметке 249 м в.у.м. водоток делает коленообразный изгиб и продолжает свое движение на запад. Воды источника выходят на поверхность через несколько отверстий в бетонной рубашке, защищающей поворот реки от размыва. Источник работает круглогодично. Его средний расход составляет 2,3 л/с ($C_v = 0,61$), электропроводность $C_1 = 0,732$ мСм/см ($C_v = 0,19$), $C_2 = 0,964$ мСм/см ($C_v = 0,16$), минерализация 0,627 г/л ($C_v = 0,16$), температура 12,2 °С ($C_v = 0,14$). Условия формирования его вод остаются неясными. Предположительно он дренирует правобережный участок долины в области развития мергелей верхнего эоцена. Здесь известны подземные воды, способствующие современному развитию реликтовых гипогенно-карстовых полостей [21, 22] и имеющие низкую 11–12 °С температуру. Вероятно их разгрузка осуществляется в источник Мостовой. Несистематический 4-летний цикл наблюдений позволил лишь выявить сезонную цикличность температуры воды с максимумами в сентябре-октябре и минимумами в феврале-марте, а также растущие тренды всех анализируемых показателей.

Источник Ковчег (Арбат) расположен на правобережной пойме р. Абдалка за одноименным рестораном на высоте 249 м. От источника Мостовой его отделяет около 100 м. Каптаж состоит из прямоугольного бетонного колодца глубиной 0,5 м, на дне которого стоит вода. Рядом в 4 м оборудована каменная ступень, из-под которой выбивается струя воды, образующая рукав, соединяющийся с рекой.

Правобережное положение источника и наличие относительно большой водосборной площади между рекой и бровкой Внешней гряды позволяют предположить, что его питание осуществляется с территории микрорайона Красная горка и Загородное. Источник имеет среднюю электропроводность $C_1 = 0,897$ мСм/см, $C_2 = 1,164$ мСм/см, минерализацию 0,760 г/л (все $C_v = 0,12$), температуру 13 °С ($C_v = 0,05$) и расход 9,5 л/с ($C_v = 0,68$).

Несмотря на прерывистость наблюдений за расходами источника Ковчег (рис. 10, 1а), отмечается слабо выраженная нисходящая сезонная цикличность с большой (более 15 л/с) и малой (более 9 л/с) водообильными фазами, приходящимися соответственно на февраль-апрель и июнь, и меженными периодами в августе-сентябре (около 5 л/с). Абсолютные годовые максимумы на гидрографе источника синхронны с абсолютными минимумами на гидротермической кривой, где

выделяются пять годовых максимумов (за 4,5 года наблюдений), приходящиеся исключительно на ноябрь, и четыре минимума, соответствующие марту-апрелю.

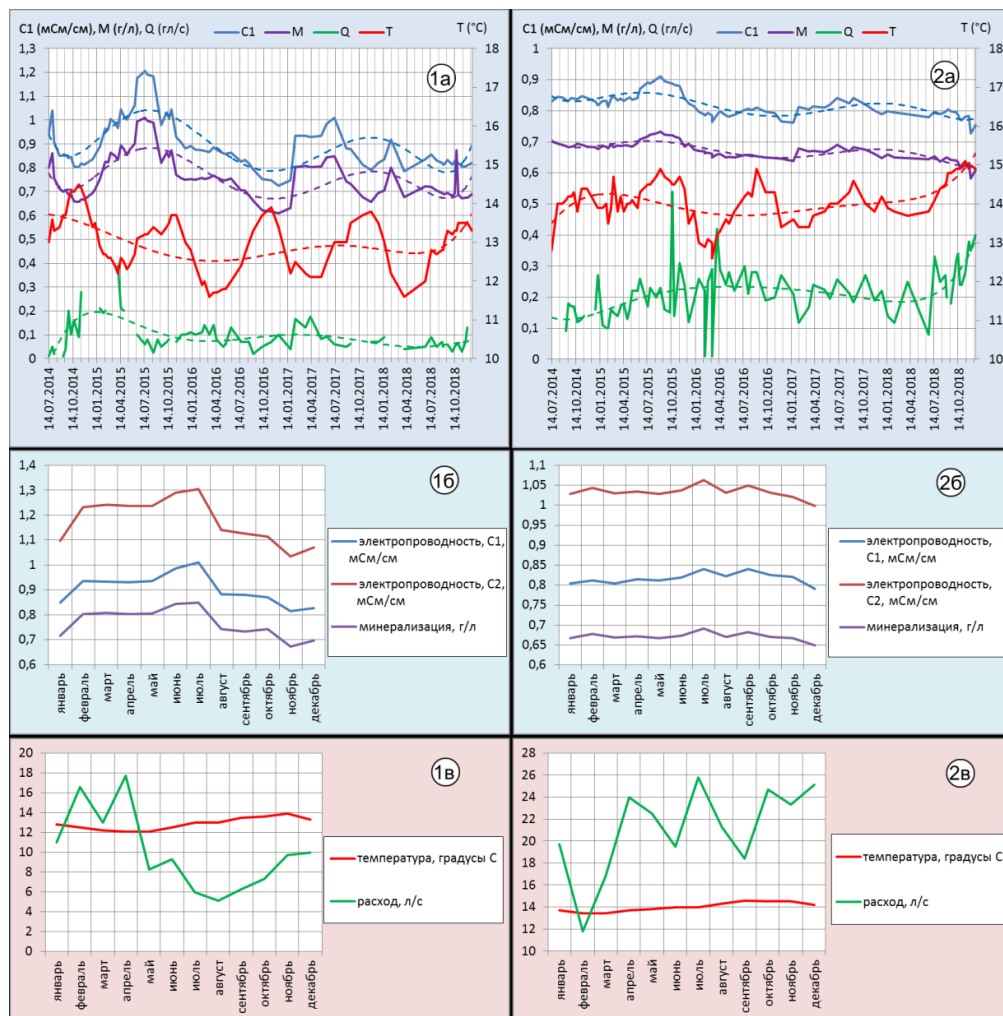


Рис. 10. Режимы (а) электропроводности (C_1 , мСм/см), минерализации (M , г/л), температуры (T , °C) и расхода (Q , гл/с) воды источников Ковчег (1) и Титова (2) в 2014–2018 гг. и их характер внутри генерализованного года (б, в).

Минимумы температур соответствуют окончанию фазы вытеснения холодных зимне-весенних вод и началу выхода относительно теплых вод, связанных с майскими-июньскими осадками. Меженный август-сентябрьский период с минимальным количеством воды в КВС способствует ее хорошему прогреву. Период нагревания в Крыму может продолжаться до конца октября. С учетом

ФОРМИРОВАНИЕ И РЕЖИМ КАРСТОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В БАССЕЙНЕ Р. АБДАЛКА (ПРЕДГОРНЫЙ КРЫМ)

добегания прогретых вод от области питания к области разгрузки и с учетом появления холодных осадков лишь в ноябре, на этот месяц чаще всего и приходится годовые гидротермические максимумы источника.

Характер распределения электрохимических параметров существенно отличается от характера гидротермической кривой и гидрографа (рис. 10, 1а–1в). На графиках электропроводности и минерализации фиксируется ряд синхронных между собой экстремумов, детальный анализ которых позволяет выявить завуалированную цикличность, трансформированную по отношению к распределению температур воды и расходов. Во-первых, отмечается положение экстремумов электрохимических показателей и температуры со смещением до 1–2 месяцев, во-вторых, существенное нарушение в гидрохимический режим источника внесла аномально влажная первая половина 2015 г. После этой даты на фоне незначительных восходящих вариаций электрохимических показателей происходило заметное общее снижение значений, окончившееся лишь к декабрю 2016 г. Такой длительный период падения электропроводности и минерализации можно объяснить обильными твердыми осадками начала 2015 г. и мощными ливнями в мае–июне того же года, которые способствовали заполнению небольшой КВС источника Ковчег, ее промыву от компонентов, обеспечивающих высокую электропроводность и минерализацию, и улучшению канализованного стока в целом. После промыва системы и до декабря 2016 г. происходило медленное накопление компонентов, отвечающих за высокие значения электрохимических показателей. В дальнейшем цикличность приобрела более выразительный характер.

Источник Титова расположен на левобережной пойме в устьевой части р. Абдалка при пересечении ею улицы Титова. Абсолютная отметка выхода карстовых вод составляет 245 м в.у.м. При детальном рассмотрении территории выявляется несколько сосредоточенных в радиусе 25–30 м родников, разгружающихся на окончании междуречья у слияния М. Салгира и Абдалки. Выходы большей части родников приурочены к аллювиальным отложениям. Можно предположить, что частично они подпитываются речными водами. Самый крупный в этой группе родник имеет облицованный плиткой бетонный каптаж со ступенями, из которого выходят три железных трубы. Вода вытекает круглогодично и 20-метровой длины ручьем впадает в р. Абдалка. Среднее значение ее электропроводности $C_1 = 0,818$ мСм/см, $C_2 = 1,032$ мСм/см, минерализации 0,671 г/л, температуры 14,1 °С (все $C_v = 0,04$), расхода 21,2 л/с ($C_v = 0,41$).

Гидрограф источника Титова (рис. 10, 2а) представлен хаотически разбросанными за период наблюдений пиками и депрессиями, которые не согласуются с кривыми электрохимических показателей и температуры. Линейный тренд гидрографа указывает на общее увеличение водности источника за весь период наблюдения. Отмечается отсутствие реакции на обильные осадки мая–июня 2015 г. и хороший отклик на дожди октября–ноября, прошедшие после сравнительно короткой летней межени. Это свидетельствует о существенных отличиях водообменных процессов питающей системы родника от других расположенных выше по долине систем. Очевидно, воды в родник приходят в виде стока,

зарегулированного (перераспределенного) другими системами и обладающего собственными оригинальными чертами. Вероятно также, что определенное влияние на характер гидрографа источника оказывают речные воды Абдалки и М. Салгира.

Хорошую сезонную цикличность демонстрирует гидротермическая кривая. На ней выявляются пять циклов с максимальными, преимущественно осенними, значениями температур и минимальными – зимне-весенними. На фоне относительно малой водности и низкого уровня осадков 2014 г. прогрев карстовых вод продолжался до ноября. После повышения водности в 2015–2017 гг. большие объемы вод максимально прогревались медленнее и лишь до сентября. Независимо от водности минимальные температуры источника проявляются чаще всего в последний месяц зимы, а благодаря появлению снежного покрова в марте, могут смещаться на начало весны (рис. 10, 2а, 2в).

По сравнению с другими родниками воды источника Титова имеют самую высокую среднюю температуру. Линейный тренд гидротермической кривой указывает, что за период наблюдения температура воды в нем поднимается со скоростью 0,1 °С в год. Очевидно, это связано с самым отдаленным положением от области питания и самой низкой абсолютной отметкой. За столь длинный путь карстовые воды источника успевают значительно прогреваться. Этому возможно способствует увеличение доли теплых летних осадков в питании и обогревающее влияние большого города, в частности связанное с ростом антропогенных утечек. Эти типы вод обладают низкой электропроводностью и минерализацией, что в итоге ведет к формированию нисходящих трендов у последних.

Характер распределения электрохимических показателей (рис. 10, 2а, 2б) имеет некоторое сходство с гидротермической кривой, выявляя слабую сезонную цикличность. Отличия заключаются в очень слабом выражении циклов 2014, 2016 и 2018 гг. и протяженном, но выразительно представленном цикле 2015 г. Последний характеризуется максимальными значениями электропроводности и минерализации в начале сентября (пик синхронен с максимальной температурой) и минимальными в феврале 2015 и марте 2016 г. (депрессии синхронны с минимальной температурой). Слабая выразительность циклов минерализации в 2016 и 2018 гг. может быть объяснена повышенной обводненностью системы после водообильных 2015 и 2017 гг. Распределение электрохимических показателей источника Титова в определенной степени сходно с распределением в источнике Ковчег. Не совпадают лишь даты минимальных значений и степень выразительности годовых циклов.

В заключении следует отметить характерные для источников области разгрузки территориальные закономерности в распределении электрохимических, температурных и расходометрических показателей. Так рассчитанные средние значения составили для электропроводности $C_1 = 0,887$ мСм/см, $C_2 = 1,075$ мСм/см, минерализации 0,705 г/л, температуры 12,9 °С, расхода 8,4 л/с. Вдоль русла р. Абдалка от родника Исток до источника Титова наблюдается скачкообразное нарастание электропроводности и минерализации, слабо зависящее от расстояния вдоль реки и высотных отметок водопроявлений. То же можно сказать о распределении дебитов источников. Всё это указывает, что движение и разгрузка

ФОРМИРОВАНИЕ И РЕЖИМ КАРСТОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В БАССЕЙНЕ Р. АБДАЛКА (ПРЕДГОРНЫЙ КРЫМ)

карстовых вод в КВС бассейна р. Абдалка осуществляется по сети обособленных трещинных зон, имеющих собственные микроводосборы и условия формирования гидрохимических показателей. Только температура воды, несмотря на некоторые колебания, демонстрирует тесную ($r = 0,65$) связь со степенью удаления от родника Исток.

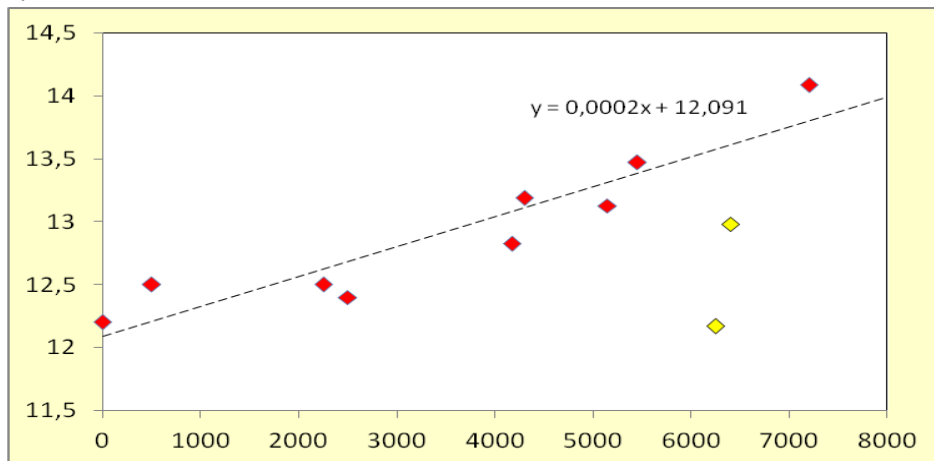


Рис. 11. Эмпирическая зависимость между температурой вод (ось ординат, °С) карстовых источников в долине р. Абдалка и их удаленностью (ось абсцисс, м) от истока.

Нарушающие закономерность понижения температуры в одном случае связаны с 1,5-километровым подземным движением вод, поглощенных в поноре Раков и их соответствующим охлажденным состоянием на выходе в источнике Верхний ключ, а в другом, с подтоком более холодных вод в источники Ковчег и Мостовой с правобережья из микрорайона Красной горки и Загородного. Если эти источники правобережья (показаны желтыми точками на рис. 11) удалить из анализируемой выборки, теснота связи между температурой и расстоянием увеличивается до $r = 0,93$.

Результаты гидрохимических и гидрофизических исследований в бассейне р. Абдалка резюмирует график термо- и хемогенеза подземных вод (рис. 12). Он иллюстрирует, как между собой взаимосвязаны осадки, воды областей питания, транзита, разгрузки и включенные в анализ утечки из водонесущих сетей города. Первый и последний объекты формируют независимые линии метаморфизма подземных вод.

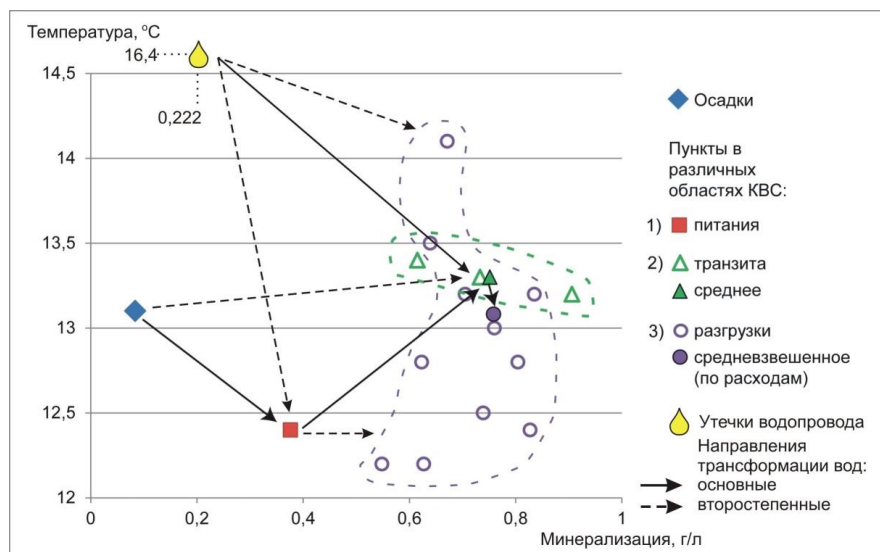


Рис. 12. Ход термохимической трансформации подземных вод в бассейне р. Абдалка.

Осадки, трансформируясь в инфильтрационные воды, наиболее успешно пополняют среднеэоценовый водоносный горизонт в области питания, где для этого имеются максимально благоприятные условия (высокая трещиноватость и закарстованность пород, отсутствие или маломощность почвенного покрова и др.). В водоносный горизонт области транзита осадки могут попадать с меньшей долей вероятности. Лимитирующими факторами здесь выступают буферная функция относительно мощных почв, высокая антропогенная зарегулированность стока, снижение количества осадков и увеличение испарения. По основному направлению трансформации осадков наблюдается устойчивый рост минерализации и скачкообразный ход температуры на всем пути движения вод к области разгрузки. Ход метаморфизма осадков, выпадающих над областью транзита, отличается ростом минерализации и температуры.

Трансформация антропогенных утечек, которые отличаются высокой средней температурой (16,4 °C) и низкой средней минерализацией (0,222 г/л) происходит относительно простым путем. Независимо от характера направления она сопровождается повышением минерализации и падением температуры вод. Основная доля утечек происходит в наиболее заселенных и обеспеченных водонесущими коммуникациями областях транзита и разгрузки. В области питания такие сети отсутствуют, и направление поддерживается только за счет сезонных поливов привозной водой на дачах Каменского массива.

Обращает на себя внимание наложение термохимических полей и близость «центров тяжести» области транзита и разгрузки. Это еще раз свидетельствует о том, что питание карстовых источников в долине р. Абдалка осуществляется водами среднеэоценового водоносного горизонта, анализируемые свойства которого формируются в основном в области транзита. Почти все источники лежат в диапазоне минерализации, обусловленном водами области транзита. Из температурного диапазона выбивается источник Титова, обладающий самыми теплыми водами, и источники верхней и средней части долины, имеющие на 0,3–1,2 °С более холодную воду, чем среднее значение области транзита. В отношении первого следует отметить, что его термогенез связан с водами антропогенных утечек в значительно большей степени, чем у источников с температурой близкой к подземным водам области транзита. Термогенез остальных источников с температурами ниже, чем у вод области транзита, может быть объяснен только влиянием холодных вод области питания. Такое влияние, передающееся от области питания к области разгрузки и не подвергающееся существенному изменению со стороны вод области транзита, возможно при наличии хорошо канализованных и вероятно изолированных систем стока с быстрой передачей температурного сигнала. В соответствии с графическими данными (рис. 12) с такими системами подземного стока с большой степенью вероятности связаны источники Исток, Каптаж, Верхний и Белый ключ и Белый–2, с меньшей степенью – Мостовой и Ковчег.

ВЫВОДЫ

Проведенные многолетние наблюдения за подземными водами в долине р. Абдалка и выполненный по ним анализ позволяет сформулировать несколько основных выводов.

1. Для бассейна р. Абдалка рассмотрен 5-летний ход температуры воздуха, относительной влажности, количества осадков и мощности снега – метеозлементов, играющих ключевую роль в формировании запасов и режима подземных вод. Подтверждены их известные региональные закономерности распределения и взаимосвязи. Из особенностей следует выделить наметившиеся за 5-летие тенденции к слабому снижению относительной влажности и влагозапасов в снеге и увеличению температуры воздуха и количества осадков. Отмечается усиление антропогенного влияния на подземные воды, связанное с поливами (дачи) и утечками из водонесущих сетей города.

2. Бассейн р. Абдалка располагается на структурном склоне куэстового массива Внутренней гряды Крыма. Горные породы и подземные воды, циркулирующие в них, представляют собой карстово-водоносную систему, состоящую из трех функционально взаимосвязанных элементов: области питания, области транзита, и области разгрузки. Для каждой области характерны конкретные процессы формирования гидрохимических, гидрофизических и гидродинамических полей,

которые исследовались посредством мониторинга электропроводности, минерализации, температуры и расхода воды.

3. В области питания КВС бассейна р. Абдалка происходит пополнение эоценового водоносного горизонта за счет инфильтрационных и инфлюационных вод. В зависимости от сезона года и температуры осадков происходит нагревание или охлаждение инфильтрационных вод на пути движения к водоносному горизонту. В целом за год здесь преобладает охлаждение вод, 5-кратное снижение годовой амплитуды температуры по сравнению с осадками, но сохраняется синхронная поверхности термическая цикличность. Для вод эоценового водоносного горизонта наблюдается 4-кратный рост электропроводности и минерализации и существенное снижение их внутригодовой вариативности.

4. В области транзита осуществляется движение карстовых вод в водоносном горизонте к месту своей разгрузки. Здесь располагаются основные резервуары, выполняющие функции накопления, перераспределения, сохранения и сброски подземных вод. От области питания к области транзита фиксируется прирост значений всех анализируемых показателей в 1,2–1,3 раза. Для области транзита характерны их максимальные вертикальные и минимальные горизонтальные градиенты. Режим параметров в обеих областях имеет больше черт сходства, чем различий (например, для температуры – совпадение максимумов в августе при низком наполнении системы и минимумов в зимне-весеннее время с разницей в 1 месяц при высоком наполнении, для электропроводности и минерализации – совпадение минимумов в мае-июле с разницей в 1 месяц).

5. В области разгрузки происходит полный или частичный выход карстовых вод на поверхность. В бассейне р. Абдалка насчитывается 11 карстовых источников, приуроченных к руслу или пойме долины и дренирующих воды эоценового водоносного горизонта. Большинство из них расположены парно вблизи устьев консеквентных балок, впадающих в р. Абдалка. Близкое расположение парных источников связывается с зонами повышенной трещиноватости, контролирующими положение балок, и обеспечивает их сходные режимы температур и водности. Режимы электропроводности и минерализации у таких источников могут отличаться. Между всеми источниками бассейна распределение этих параметров и расходов не выявляет каких-либо закономерностей. Это указывает на то, что движение и разгрузка карстовых вод в КВС бассейна р. Абдалка осуществляется по сети обособленных трещинных зон, имеющих собственные микроводосборы и условия формирования гидрохимических показателей.

От области транзита к области разгрузки наблюдается падение значений всех анализируемых показателей, кроме расхода. Среди возможных причин такой ситуации – влияние конденсационного стока, антропогенных утечек и полива, подпитка речными водами, прошедшими гидрохимическую трансформацию в ставках – естественных отстойниках и испарителях.

Необходимы дальнейшие исследования подземных вод бассейна р. Абдалка и смежных водосборов с привлечением новейших методов изотопно-гидрохимического мониторинга и моделирования.

ФОРМИРОВАНИЕ И РЕЖИМ КАРСТОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В БАССЕЙНЕ Р. АБДАЛКА (ПРЕДГОРНЫЙ КРЫМ)

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Совета Министров Республики Крым в рамках научного проекта № 18-45-910007, код р_а.

Список литературы

1. Амеличев Г. Н., Олиферов А. Н., Новикова Ф. Н. Гидрологические особенности реки Абдалка (Симферополь) в области питания артезианского бассейна Равнинного Крыма // Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. Т. 3 (69). №1. 2017. С. 161–176.
2. Амеличев Г. Н., Токарев С. В., Вахрушев Б. А. Химическая денудация как показатель активизации карста в пределах урбанизированных территорий Крыма (на примере восточной части Симферополя) // Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. Т. 3 (69). №1. 2017. С.177–191.
3. Амеличев Г.Н., Галкина М.В. Карст и подземные воды в истоке р. Абдалка (Симферополь, Крым) / Сб. тезисов участников IV научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, студентов и молодых ученых «Дни науки КФУ им. В.И. Вернадского», Т. 2. Таврическая академия. Симферополь, 2018. С.275–276.
4. Амеличев Г.Н., Галкина М.В. Генезис и современное состояние карста в истоке р. Абдалка (Симферополь, Крым) / Сборник трудов IV Научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, студентов и молодых ученых «Дни науки крымского федерального университета им. В.И. Вернадского», Симферополь, 10 – 17 октября 2018 г. Симферополь, 2019. С.31–37.
5. Амеличев Г.Н. Подземные карстовые воды в верхнем течении р. Абдалка (Симферополь, Предгорный Крым) // Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. Т. 4 (70). № 3. 2018. С. 230–261.
6. Тимченко З.В. Реки Симферополя // Устойчивый Крым. Симферополь – южная столица. Киев-Симферополь: Сонат, 2001. С.264–275.
7. Важов В.И. Целебный климат. Симферополь: Таврия, 1979. 80 с.
8. Ведь И.П. Климатический атлас Крыма. Симферополь: Таврия-Плюс, 2000. 120 с.
9. Бабков И.И. Климат Крыма. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 88 с.
10. Ресурсы поверхностных вод СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1966. Т.6. Вып.4. 345 с.
11. Климат и опасные гидрометеорологические явления Крыма / Под ред. К.Т. Логвинова, М.Б. Барабаш. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 317 с.
12. Широков О.В. Абдал (Загородное, Белое) — «неуклюжий» район Симферополя // Информационно-аналитическая газета «Крымское эхо», 8 сентября, 2012.
13. Дублянский В.Н., Кикнадзе З.К. Гидрогеология карста Альпийской складчатой области юга СССР. М.: Наука, 1984. 128 с.
14. Дублянский В.Н. Карстовые пещеры и шахты Горного Крыма. Л.: Наука, 1977. 180 с.
15. Караванов К.П. Бассейны подземных вод горно-складчатых областей восточной Азии. М.: Наука, 1977. 142 с.
16. Максимович Г.А. Основы карстоведения. Т.2. Пермь, 1969. 529 с.
17. Dublyansky Y.V., Klimchouk A.B., Tokarev S.V., Amelichev G.N., Langhamer L., Spötl C. Stable isotopic composition of atmospheric precipitation on the Crimean Peninsula and its controlling factors // Journal of Hydrology, 565 (2018) 61–73.
18. 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, 2012. С.14–21.
19. Дублянский Ю.В., Климчук А.Б., Токарев С.В., Амеличев Г.Н., Шпётль К. Результаты режимных измерений изотопных характеристик атмосферных осадков Крыма в 2010–2014 гг. // II Крымские карстологические чтения: Изучение и использование естественных и искусственных подземных пространств и закарстованных территорий. Симферополь, 2018. С. С.83–87.

20. Тимофеев Д.А., Дублянский В.Н., Кикнадзе Т.З. Терминология карста. М.: Наука, 1991. 260 с.
21. Шутов Ю.И. Заключение о происхождении карстового провала на территории спецавтобазы «Укрмясомолтранс» // Фонды Института минеральных ресурсов. Симферополь, 1981. 4 с.
22. Амеличев Г.Н., Дмитриева А.Ю., Самохин Г.В. Гипогенный карст Симферополя (Предгорный Крым) и его эволюция // Спелеология и карстология. № 8, 2012. С.50–62.

FORMATION AND REGIME OF KARST GROUNDWATERS IN THE BASIN OF ABDALKA RIVER (PIEDMONT CRIMEA)

Amelichev G. N.¹, Tokarev S. V.¹, Tokarev I. V.²

¹*V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Crimea*

²*Science Park of St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

E-mail: lks0324@yandex.ru

The article presents the results of a 5-year monitoring of the specific electrical conductivity, mineralization, temperature and flow of groundwater within the basin of the Abdalka river in Simferopol. The influence of climatic factors (air temperature, precipitation and snow thickness) on the formation of water reserves and their regime is considered. The tendencies to a weak decrease in relative humidity and moisture reserves in the snow and an increase in air temperature and precipitation are outlined during the period of observation. An increase in the anthropogenic effect on groundwater associated with the growth of anthropogenic runoff is noted.

Three functionally interrelated elements of the karst-aquifer system of the basin are distinguished: the areas of recharge, transit and discharge of karst waters. In the recharge area, the Eocene aquifer is replenished by meteoric waters. Compared with precipitation, there is a decrease in the temperature of infiltration waters, an increase in mineralization and electrical conductivity, a decrease in the variability of all indicators. In the transit area, where the main reservoirs are located, performing the functions of accumulation, redistribution, preservation and further transportation of groundwater, an increase in the values of all analyzed indicators is recorded. Regimes of recharge and transit areas have more similarities than differences. In the discharge area, the karst waters resurge completely or partially. There are 11 karst springs located to riverbed or floodplain of the valley and draining the waters of the Eocene aquifer in the basin of the Abdalka river. Most of them have a similar thermal regime and significant differences in the formation of the electrical conductivity and mineralization regime. From the upper reaches of the valley to the lower reaches, a regular rise in the temperature of the water sources is observed, which is associated with an increase in the proportion of warm summer precipitation and the amount of anthropogenic recharge.

An expressive hydrothermic inter- and intra-annual cyclicity has been established for the groundwater of all three areas. A graph of thermochemical metamorphism of groundwater in the Abdalka river has been built, which demonstrates the main and secondary directions of changes in their temperature and mineralization from the recharge area to the discharge area. This information is the base for the further formulation of the mixing equations for

different types of waters and the determination of their volumetric characteristics in water-balance studies.

Further study of groundwater in the basin of Abdalka river and adjacent watersheds involving of the latest methods of isotope-hydrochemical monitoring and modeling are needed.

Keywords: groundwater, karst-aquifer system, groundwater runoff, recharge, transit, discharge, karst spring, regime, Abdalka river, Simferopol.

References

1. Amelichev G. N., Oliferov A. N., Novikova F. N. Gidrologicheskie osobennosti reki Abdalka (Simferopol') v oblasti pitaniya artezianskogo bassejna Ravninnogo Kryma (Hydrological features of the Abdalka river (Simferopol) in recharge area of the Plain Crimea artesian basin). Uchjonye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Geografija. Geologija, V. 3(69), no 1, 2017, pp. 161–176 (in Russian).
2. Amelichev G. N., Tokarev S. V., Vahrushev B. A. Himicheskaja denudacija kak pokazatel' aktivizacii karsta v predelah urbanizirovannyh territorij Kryma (na primere vostochnoj chasti Simferopolja) (Chemical denudation as an indicator of activation of karst in the urban areas of the Crimea (for the eastern part of Simferopol as example). Uchjonye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Geografija. Geologija, V. 3(69), no 1, 2017, pp. 177–191 (in Russian).
3. Amelichev G.N., Galkina M.V. Karst i podzemnye vody v istoke r. Abdalka (Simferopol', Krym) (Karst and groundwater in the head of the Abdalka river (Simferopol, Crimea). Sb. tezisov uchastnikov IV nauchno-prakticheskoy konferencii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, aspirantov, studentov i molodyh uchenyh «Dni nauki KFU im. V.I. Vernadskogo», V. 2. Tavricheskaja akademija. Simferopol', 2018, pp. 275–276 (in Russian).
4. Amelichev G.N., Galkina M.V. Genesis i sovremennoe sostojanie karsta v istoke r. Abdalka (Simferopol', Krym) (Genesis and current state of karst in the head of the Abdalka river (Simferopol, Crimea). Sbornik trudov IV Nauchno-prakticheskoy konferencii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, aspirantov, studentov i molodyh uchenyh «Dni nauki krymskogo federal'nogo universiteta im. V.I. Vernadskogo», Simferopol', 10 – 17 oktjabrja 2018 g. Simferopol', 2019, pp. 31–37 (in Russian).
5. Amelichev G.N. Podzemnye karstovye vody v verhnem techenii r. Abdalka (Simferopol', Predgornyj Krym) (Karst groundwater in the upper reach of the Abdalka river (Simferopol, the Crimean Piedmont). Uchjonye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Geografija. Geologija, V. 4(70), no 3, 2018, pp. 251–267 (in Russian).
6. Timchenko Z.V. Reki Simferopolja (The rivers of Simferopol). Ustojchivyy Krym. Simferopol' – juzhnaja stolica. Kiev-Simferopol': Sonat (Publ.), 2001, pp. 264–275 (in Russian).
7. Vazhov V.I. Celebnyj klimat (Healing climate). Simferopol': Tavrija (Publ.), 1979, 80 p. (in Russian).
8. Ved' I.P. Klimaticheskij atlas Kryma (The climatic atlas of Crimea). Simferopol': Tavrija-Pljus (Publ.), 2000, 120 p. (in Russian).
9. Babkov I.I. Klimat Kryma (Climate of Crimea). L.: Gidrometeoizdat (Publ.), 1961, 88 p. (in Russian).
10. Resursy poverhnostnyh vod SSSR (The resources of surface waters of the USSR). L.: Gidrometeoizdat (Publ.), 1966, V.6, Vyp.4, 345 p. (in Russian).
11. Klimat i opasnye gidrometeorologicheskie javlenija Kryma (The climate and the dangerous phenomena of Crimea). Pod red. K.T. Logvinova, M.B. Barabash. L.: Gidrometeoizdat (Publ.), 1982, 317 p. (in Russian).
12. Shirokov O.V. Abdal (Zagorodnoe, Beloe) — «neukljuzhij» rajon Simferopolja (Abdal (Zagorodnoe, Beloe) – a «clumsy» district of Simferopol). Informacionno-analiticheskaja gazeta «Krymskoe jeh», 8 sentjabrja, 2012 (in Russian).

13. Dubljanskij V.N., Kiknadze Z.K. *Gidrogeologija karsta Al'pijskoj skladchatoj oblasti juga SSSR* (Karst hydrogeology of the Alpine folded area of the southern USSR). M.: Nauka (Publ.), 1984, 128 p. (in Russian).
14. Dubljanskij V.N. *Karstovye peshhery i shahty Gornogo Kryma* (Karst caves and pits of the Mountain Crimea). L.: Nauka (Publ.), 1977, 180 p. (in Russian).
15. Karavanov K.P. *Bassejny podzemnyh vod gorno-skladchatyh oblastej vostochnoj Azii* (Groundwaters basins of the mountain-folded areas of Eastern Asia). M.: Nauka (Publ.), 1977, 142 p. (in Russian).
16. Maksimovich G.A. *Osnovy karstovedenija* (The elements of karstology). V.2. Perm', 1969, 529 p. (in Russian).
17. Dublyansky Y.V., Klimchouk A.B., Tokarev S.V., Amelichev G.N., Langhamer L., Spötl C. Stable isotopic composition of atmospheric precipitation on the Crimean Peninsula and its controlling factors. *Journal of Hydrology*, 2018, 565, pp. 61–73 (in English).
18. Dubljanskij Ju.V., Klimchuk A.B., Amelichev G.N., Tokarev S.V., Shpjotl' K. *Izotopnyj sostav atmosferynyh osadkov i karstovyh istochnikov severo-zapadnogo sklona Krymskih gor* (Isotopic composition of atmospheric precipitation and karstic springs of the north-west slope of the Crimean Mountains). *Speleologija i karstologija*, 2012, no 9, pp. 14–21 (in Russian).
19. Dubljanskij Ju.V., Klimchuk A.B., Tokarev S.V., Amelichev G.N., Shpjotl' K. *Rezultaty rezhimnyh izmerenij izotopnyh harakteristik atmosferynyh osadkov Kryma v 2010–2014 gg.* (The results of systematic analyses of isotopes in meteoric precipitation of Crimea in 2010–2014). II Krymskie karstologicheskie chtenija: *Izuchenie i ispol'zovanie estestvennyh i iskusstvennyh podzemnyh prostranstv i zakarstovannyh territorij*. Simferopol', 2018, pp. 83–87 (in Russian).
20. Timofeev D.A., Dubljanskij V.N., Kiknadze T.Z. *Terminologija karsta* (Terminology of karst). M.: Nauka (Publ.), 1991, 260 p. (in Russian).
21. Shutov Ju.I. *Zakljuchenie o proishozhdenii karstovogo provala na territorii specavtobazy «Ukrnjasomoltrans»* (The conclusion of origin of karst collapse on territory of the motor depot «Ukrnjasomoltrans»). *Fondy Instituta mineral'nyh resursov*. Simferopol', 1981, 4 p. (in Russian).
22. Amelichev G.N., Dmitrieva A.Ju., Samohin G.V. *Gipogennyj karst Simferopolja (Predgornyj Krym) i ego jevoljucija* (Hypogene karst of Simferopol (Piedmont Crimea) and its evolution). *Speleologija i karstologija*, 2012, no 8, pp. 50–62 (in Russian).

Поступила в редакцию 09.04.2019