

РАЗДЕЛ 2.
ГЕОМОРФОЛОГИЯ И ЭВОЛЮЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ.
ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ.
ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 551.44

**ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ
КАРСТОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ
Г. СИМФЕРОПОЛЬ В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННО-НАРУШЕННОГО
РЕЖИМА**

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

¹Таврическая академия ФГАОУ 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: tokcrimea@list.ru

Мониторинг проявлений подземных вод в пределах части эоценовой куэсты Внутренней гряды Крымских гор между долиной р. Салгир и Петровской балкой проводится с 2014 г. и включает измерение расходов, температуры, удельной электропроводности, анализ ионного и изотопного ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$) состава вод. Основными объектами наблюдений являются источники «Петровский фонтан», «Петровский нижний», «Петровские скалы» и «Петровский верхний». На общем похожем фоне режимы отдельных источников имеют индивидуальные особенности хода температур, минерализации и изотопного состава вод. Выяснено, что в формировании режима подземных вод района, наряду с природными факторами, зачастую определяющее значение имеют антропогенное воздействие. Сделана предварительная оценка доли антропогенной составляющей в питании подземных вод района.

Ключевые слова: подземные воды, карстовый источник, Симферополь, удельная электропроводность, сезонная цикличность, антропогенное питание, загрязнение вод, изотопный состав, нарушенный режим.

ВВЕДЕНИЕ

Еще 100 лет назад карстовые подземные воды г. Симферополь имели исключительное значение для водоснабжения городского населения. Особую роль играли источники района Петровской балки, расположенной в юго-восточной части города. При переходе на водоснабжение из поверхностных водохранилищ (сначала Аянского, а в дальнейшем – Симферопольского и Партизанского), значение источников было утрачено. Одновременно происходило освоение указанного района, преимущественно под жилую застройку, под которую попали и области питания основных источников, что привело к изменению их режима. Часть

местного населения до сих пор использует подземные воды из источников и колодцев для бытовых целей, в том числе для питья. В настоящее время, в связи с напряженной ситуацией в системе водоснабжения Крыма, эти источники следует рассматривать как резервные на случай проблем с централизованным снабжением.

Государственная сеть мониторинга подземных и поверхностных вод не затрагивает данный район. Поэтому целью работы является выяснение актуальных условий питания и разгрузки/эксплуатации подземных вод района Петровской балки. Мониторингом выявлялся гидродинамический, гидрохимический, изотопный ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) и термический режим для установления степени антропогенной трансформации стока. Результаты наблюдений образуют основу для водно-балансовых расчетов и гидрогеологического моделирования подобных бассейнов. Они же необходимы для оценки состояния подземных вод как индикатора загрязненности геологической среды. Поскольку подземные воды рассматриваемого района относятся преимущественно к карстовому типу, изучение их режима также важно для оценки интенсивности карстового процесса, что является актуальной задачей для урбанизированных территорий.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА

Основные водоносные горизонты г. Симферополя связаны с известняками среднего эоцена (симферопольский региоярус), известняками готерив-барремского яруса нижнего мела, известняками сарматского яруса миоцена, а также четвертичными аллювиальными и пролювиальными отложениями [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Район данного исследования площадью 3,3 км² находится в юго-восточной части г. Симферополь, в орографическом плане занимает часть Внутренней куэстовой гряды Крымских гор между долиной р. Салгир и Петровской балкой (рис. 1).

Гряда в структурно-геологическом отношении представляет собой моноклираль с падением пластов на северо-запад под углом 2–3°. Верхний этаж сложен бронирующим слоем массивных нуммулитовых известняков среднего эоцена мощностью до 40 м. В северо-западном направлении они погружаются под толщу мергелей верхнего эоцена (новопавловско-альминский региоярус), слагающих межгрядовое продольное понижение перед эскарпом Внешней гряды. Известняковая толща нарушена вертикальными трещинами с азимутами 0–5° и 325–330°, которые фиксируются на обнажениях в эскарпе куэсты и в расчистках на структурном склоне. Большинство из них носит следы растворения.

В основании симферопольского яруса залегает водоупор – мергели и глины бахчисарайского региояруса. Среднеэоценовая толща подстилается с угловым несогласием породами нижнего мела, представленными глинами апт-альбского и известняками готерив-барремского ярусов (рис. 2) и выходящими на поверхность в основании юго-западного эскарпа куэсты.

Поверхность структурного склона куэсты прикрыта маломощным (1–2 м) чехлом элювия и делювия, на которых развиваются дерново-карбонатные почвы. Естественная растительность представлена петрофитными степями. Петровская балка, ограничивающая район исследования с запада, заложена в субмеридианальном направлении. Ее днище выполнено пролювиальными

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КАРСТОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ...

щебнисто-песчано-суглинистыми отложениями, которые в средней и нижней частях балки достигают мощности 10 м.

Территория примерно на 50 % освоена под жилую низкоэтажную застройку, водоснабжение которой производится централизованно. При этом централизованная канализация отсутствует, за исключением северо-восточной части района с хозяйственными предприятиями. Из последних наиболее значительными являются водоочистные сооружения «Петровские скалы», станция технического обслуживания автомобилей с автомойками «Астра», автозаправочная станция. Остальная площадь, главным образом, в его южной части занята естественными ландшафтами (рис. 1). В настоящее время эта часть начинает застраиваться (микрорайон «Петровские высоты»). В северо-восточной части района сохранен значительный участок с естественной растительностью в границах историко-археологического заповедника «Неаполь Скифский».

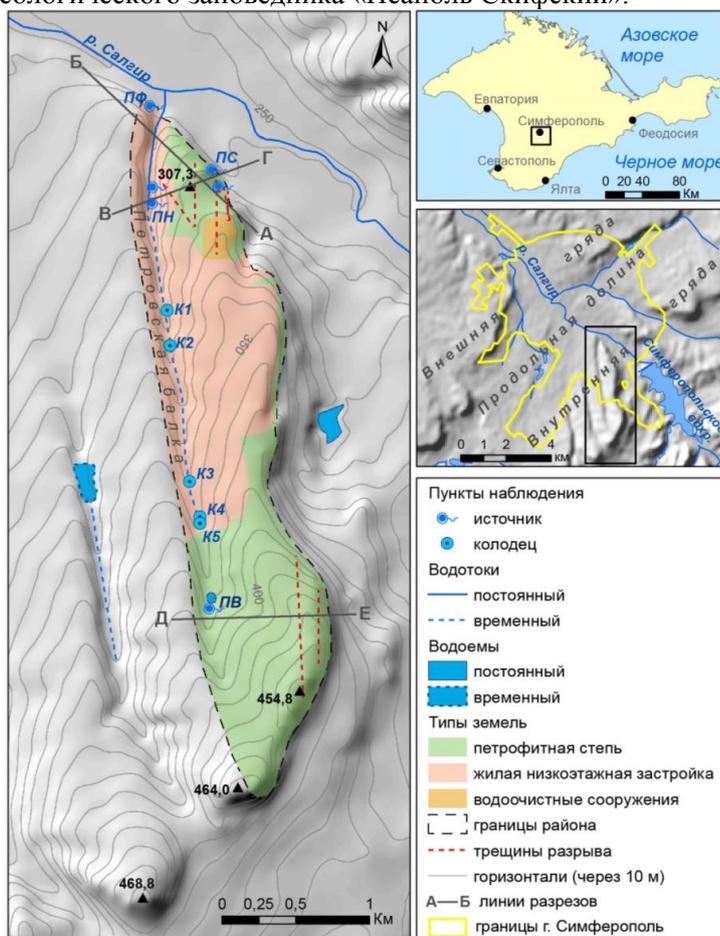


Рис. 1. План района работ с ключевыми объектами. Источники: ПФ – Петровский фонтан, ПС – Петровские скалы, ПН – Петровский нижний, ПВ – Петровский верхний (Марии Магдалины).

В связи со значительной трещиноватостью и закарстованностью известняков среднего эоцена, содержащиеся в них подземные воды относятся преимущественно к трещинно-карстовому типу. Для карстовых структур проницаемости в эоценовых известняках в пределах Симферополя обосновывается гипогенное происхождение [1, 8]. В связи с их дальнейшим раскрытием, на современном этапе происходит развитие унаследованных карстовых структур по эпигенному механизму с участием антропогенного фактора. Последний включает концентрацию поверхностного стока на искусственных покрытиях, дополнительное питание за счет утечек из водонесущих коммуникаций и канализационно-сточных вод с высокой агрессивностью, полива приусадебных участков.

В границах района работ известны 3 карстовые полости, наиболее значительная из которых имеет протяженность 125 м (пещера Алима). В заложении полостей отмечается преимущественный контроль вертикальными трещинами с простиранием север – юг, северо-запад – юго-восток. Все пещеры не имеют сколь либо значимых водопроявлений. Исключением может быть конденсационная влага и локально просачивающиеся через трещины инфильтрационные воды в незначительном объеме.

В пределах площади работ водоносный горизонт среднеэоценовых известняков имеет свободную поверхность. При погружении под мергели новопавловско-альминского яруса подземные воды приобретают напор. Нижним водупором являются глины бахчисарайского и апт-альбского ярусов имеют мощность 10–20 м и надежно изолируют нижележащий горизонт известняков готерив-баррема.

Аллювиально-пролювиальные отложения, заполняющие эрозийный врез Петровской балки, представляют собой отдельный водоносный горизонт, «вложенный» в среднеэоценовый и гидравлически с ним хорошо связанный. Очевидно, он принимает существенную часть стока из известняков симферопольского яруса, и разгружается в аллювий долины р. Салгир. Разгрузка остальной части стока среднеэоценового горизонта происходит через источники в правом борту Петровской балки и на северо-восточном эскарпе куэсты (Рис. 1).

Питание среднеэоценовых известняков происходит преимущественно за счет площадной инфильтрации. Очаги точечной и линейной инфильтрации здесь неизвестны. Конденсационное питание незначительно в связи с малой обнаженностью водовмещающих известняков. Величина естественной инфильтрации контролируется количеством и режимом выпадения осадков, температурно-влажностными параметрами воздуха и почвы, а также типом растительности. По справочной информации до 1980^х г. [9] среднемноголетние осадки для г. Симферополь составляли 501 мм/год. Отмечалось преобладание осадков теплого периода – 305 мм в апреле–октябре (120–140 мм за май и июнь) и 196 мм в ноябре–марте. Среднегодовая температура составляла 10,2 °С. Расчетное суммарное испарение по справочным данным от 440 мм/год [10] до 560 мм/год [11].

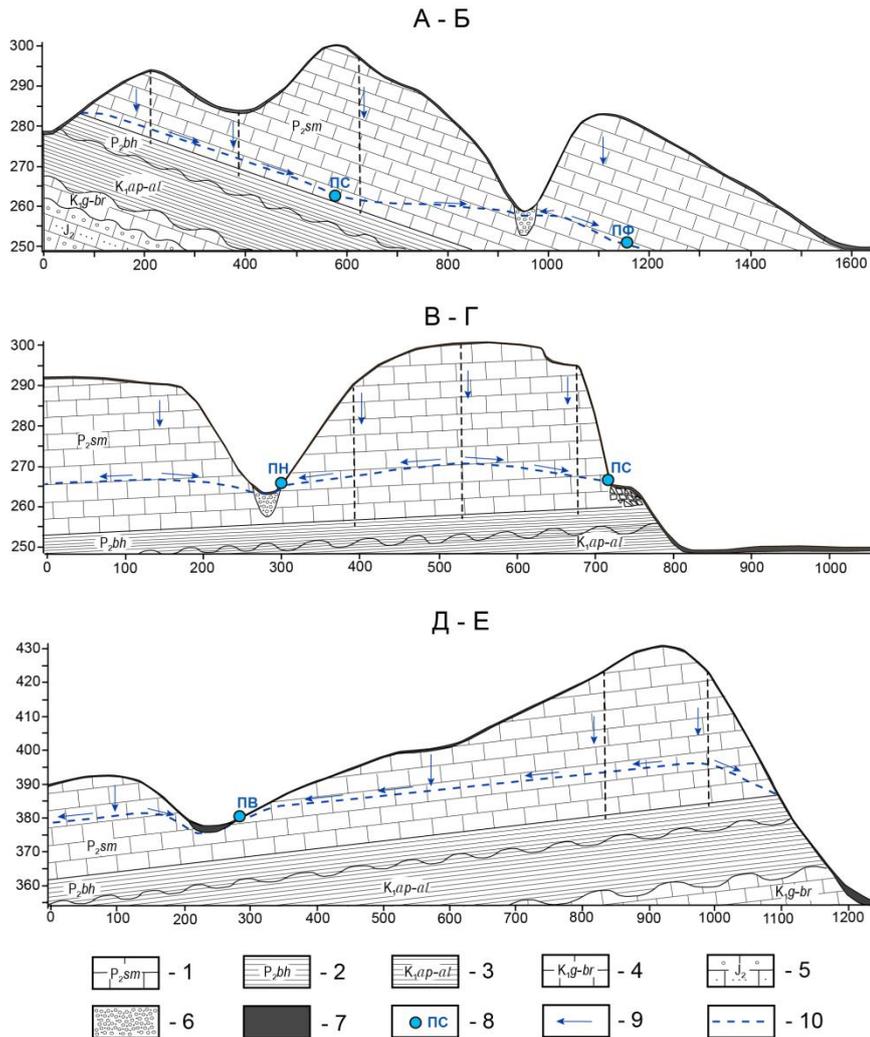


Рис. 2. Гидрогеологические разрезы через ключевые объекты наблюдения (стратиграфия дана по [6]) (линии разрезов показаны на рис. 1).

1 – водоносный горизонт в известняках симферопольского яруса; 2 – водоупорные глины бахчисарайского яруса; 3 – водоупорные глины аптского и альбского ярусов; 4 – водоносный горизонт в известняках готеривского и барремского ярусов; 5 – слабопроницаемые конгломераты и песчаники средней юры; 6 – водоносный горизонт в аллювиально-пролювиальных отложениях; 7 – почва; 8 – источники; 9 – предполагаемые направления движения подземных вод; 10 – нижняя граница зоны аэрации.

По наблюдениям на метеостанциях г. Симферополя за 2014–2018 г., в среднем, годовое количество осадков – 570 мм, годовая температура воздуха – 12,2 °С, относительная влажность воздуха – 72 % (до 2000 г. – 74 %). Самыми дождливыми

месяцами остаются июнь (98 мм) и май (72 мм), самым засушливым – август (14 мм). В летний период осадки выпадают часто в виде ливней с формированием мощного поверхностного стока, а русло Петровской балки выполняет роль коллектора, выводя поверхностный сток за пределы исследуемого района. В зимний период снеговой покров маломощен (4 см) и кратковременен. В связи с колебаниями температуры снег выпадает и стает несколько раз за сезон.

Рассчитанная для г. Симферополь [6] среднегодовая естественная инфильтрация составляла 46 мм, а суммарная, с учетом антропогенного питания, – 120–170 мм (доля дополнительного питания 61–70 %). Для Петровской балки доля антропогенного питания по прикидочным оценкам аналогична.

Таким образом, увеличение количества осадков должно способствовать росту объема инфильтрационного питания подземных вод, но, в то же время, изменение температурно-влажностного режима воздуха – приводит к увеличению суммарного испарения. Продолжающаяся застройка района, с централизованным водоснабжением жилых кварталов и практически полным отсутствием канализационной сети, предполагает рост антропогенного питания.

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТОВ

Объектами наблюдений являлись 4 выхода подземных вод (рис. 1, 2, 3): «Петровский фонтан», «Петровские скалы», «Петровский нижний», «Петровский верхний» (Марии Магдалины).

Источник «Петровский фонтан» расположен в приустьевой части Петровской балки, в ее левом борту, выходит из основания известнякового уступа высотой около 10 м. В этом месте подошва водоносного горизонта погружается под аллювий долины р. Салгир на глубину 10–20 м от поверхности. Высотная отметка выхода вод, определенная посредством баронивелирования, составляет 252 м н.у.м. Средний расход около 2 л/сек. Источник обустроен бетонным каптажем в виде бочки диаметром 1 м и высотой около 2 м. Из него по трубе вода попадает в открытый бассейн (рис. 3–Б). Часть воды теряется в обход бассейна. Сток из бассейна попадает в дренажный колодец и далее – в подземный коллектор, ведущий в р. Салгир.

В известняковом уступе над источником какие-либо трещины, могущие дать выход карстовых вод, не обнаруживаются. Однако на поверхности уступа наблюдается повышенная влажность, которая летом вызывает интенсивный процесс десквамации (отшелушивания пластин известняка), а зимой – морозного выветривания. В одном месте происходит высачивание вод с образованием капли. Все это указывает на трещинно-пластовую природу питающих источник вод. Область питания источника, скорее всего, находится юго-западнее, в пределах нижней части аструктурного склона куэсты к западу от Петровской балки.

Источник «Петровский нижний» находится в тальвеге Петровской балки, примерно в 800 м от Петровского фонтана напротив слива с очистных сооружений. Выход каптирован (рис. 3–В). Средний расход каптажа около 1 л/сек. Чуть выше него (на расстоянии около 50 м) обнаружен более мощный (по дебиту примерно в 5 раз крупнее) второй выход подземных вод, который дает начало постоянному

водотоку Петровской балки. Вода выходит в основании тальвега балки с противоположной от каптажа стороны. Высотные отметки выходов находятся в пределах 263–264 м н.у.м. В связи с полной закрытостью коренных водоносных известняков чехлом из делювиальных и антропогенных отложений, условия выхода вод не до конца ясны. Предположительно, выход связан с одной из трещин разрыва северо-западного простираения, обнаруживаемых в расчистках на восточном склоне балки (рис. 3–Д).

Источники Петровских скал, в отличие от остальных объектов, располагаются не в балке, а на восточном аструктурном склоне куэсты. Они выходят в основании 20–25-метрового известнякового уступа. Высотные отметки источников ложатся в пределы 265–266 м н.у.м. Выходы связаны с закарстованными субвертикальными трещинами, которые имеют простираение близкое к меридиональному (рис. 1). Крупнейший выход находится севернее остальных и превосходит их по дебиту более чем на порядок, составляя в среднем около 10 л/сек (рис. 3–А). Сток родниковых вод уходит в долину р. Салгир, пополняя ее аллювиальный горизонт.

Источник «Петровский верхний» («Марии Магдалины» по находящемуся рядом одноименному храму-памятнику при братском кладбище времен Крымской войны) расположен в верховьях Петровской балки, в основании ее правого склона. Выход вод каптирован (Рис. 3–Г). Средний расход составляет около 0,1 л/сек. Разгружающаяся вода собирается в небольшой копаный ставок. Абсолютная отметка источника, определенная баронивелированием, составляет 370 м н.у.м. Условия выхода вод не до конца ясны, поскольку коренные породы прикрыты делювиальным чехлом. Предполагается, что источник дренирует трещину северо-западного простираения, собирающую сток с почвенно-эпикарстовой зоны.

Все описанные источники являются круглогодичными. Второстепенными объектами, на которых производились разовые наблюдения, являются колодцы в днище Петровской балки, вскрывающие воды аллювиально-пролювиального горизонта.

МЕТОДИКА

Наблюдение режима производилось с июня 2014 г. по июнь 2017 г. с периодичностью 1–2 раза в месяц (для источников «Петровский фонтан» и «Петровские скалы»), а также раз в 1–2 месяца, а в последний год наблюдений – раз в 3–4 месяца («Петровский нижний» и «Петровский верхний»). Опробование подземных вод аллювиально-пролювиального горизонта в Петровской балке проводились разово.

Наблюдения включали измерение температуры и удельной электрической проводимости (SpC) с помощью кондуктометра YSI EcoSense EC300, расходов источников. Удельная электропроводимость приводилась к стандартной температуре 25 °С с использованием температурного коэффициента 1,91 % на 1 °С. Из полученного значения SpC рассчитывался показатель общей минерализации вод (TDS) с константой пересчета 0,65. Единожды был произведен анализ основных компонентов химического состава вод источников.



Рис. 3. Вид основных объектов наблюдения: А – главный источник на Петровских скалах, Б – Петровский фонтан, В – источник Петровский нижний, Г – источник Петровский верхний (Марии Магдалины), Д – закарстованная трещина в расчистке на территории археологического заповедника «Неаполь Скифский».

Из всех источников с разной периодичностью отбирались пробы на состав стабильных изотопов кислорода и водорода $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$. Измерения изотопного состава воды выполнялось в РЦ РДМИ Научного парка Санкт-Петербургского университета на лазерном изотопном анализаторе Picarro L2120-i с использованием стандартов МАГАТЭ и Американского геологического общества V-SMOW-2, USGS45 и USGS46. Погрешность измерений составляет $\pm 0.13\text{‰}$ по $\delta^{18}\text{O}$ и $\pm 1.5\text{‰}$ по $\delta^2\text{H}$. Результаты измерений приводятся в промилле относительно стандарта океанической воды V-SMOW.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Метеоусловия. Распределение осадков и температуры воздуха за период наблюдений представлено на рисунке 4. Максимальное количество осадков

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КАРСТОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ...

приходится на июнь (в среднем, 86 мм) и май (78 мм); минимальное – на август (17 мм) и сентябрь (18 мм). Средняя температура воздуха за срок наблюдений составила 12,1 °С, при наличии нисходящего тренда, что, вероятно, должно сказаться и на температуре подземных вод.

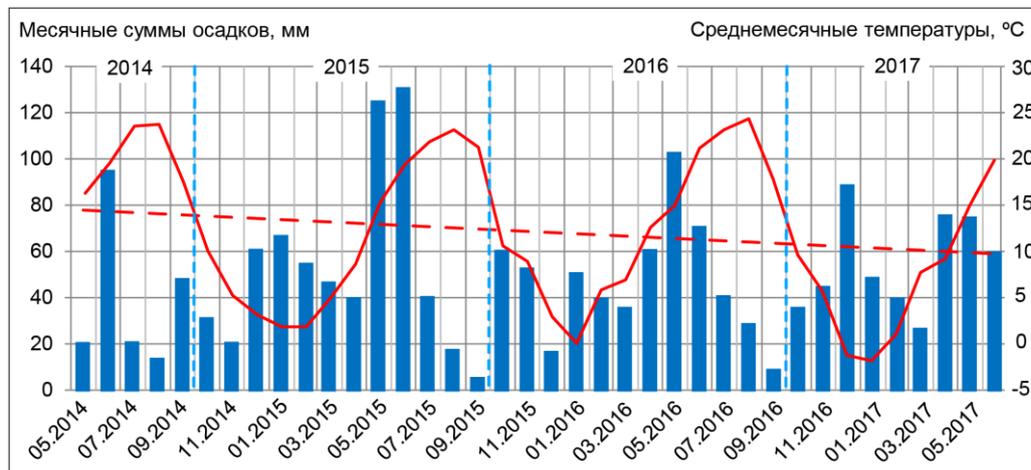


Рис. 4. Ход месячных значений основных метеозадач в г. Симферополь в течение срока наблюдений (использован архив метеоданных с сайта «Расписание погоды» gr5.ru по пункту «Симферополь аэропорт» WMO ID 33946). Столбиками показаны месячные суммы атмосферных осадков, сплошной линией – среднемесячные температуры, прерывистой линией – линейный тренд температур. Вертикальными пунктирными линиями показаны границы гидрологических лет.

Для анализа данных использован гидрологический год, началом которого, исходя из внутригодового распределения осадков, принят октябрь (окончание засушливого периода август-сентябрь), а окончанием – сентябрь следующего календарного года. Начало гидрологического года совпадает с началом накопления запасов поверхностных вод и грунтовых вод. Среднемесячное количество осадков за 2014 гидрологический год (часть, попавшая в срок наблюдений) составило 37 мм, за 2015 – 51 мм, за 2016 – 47 мм, за 2017 (до июля) – 52 мм.

Характеристика рядов данных. Временные ряды показателей, характеризующих режим источников, показаны на рисунке 5 и 6. Средние, минимальные и максимальные значения температуры и расчетной минерализации воды источников даны в таблице 1. В ходе исследования было выявлено, что все наблюдаемые источники характеризуются индивидуальными особенностями режима по всем измеряемым показателям.

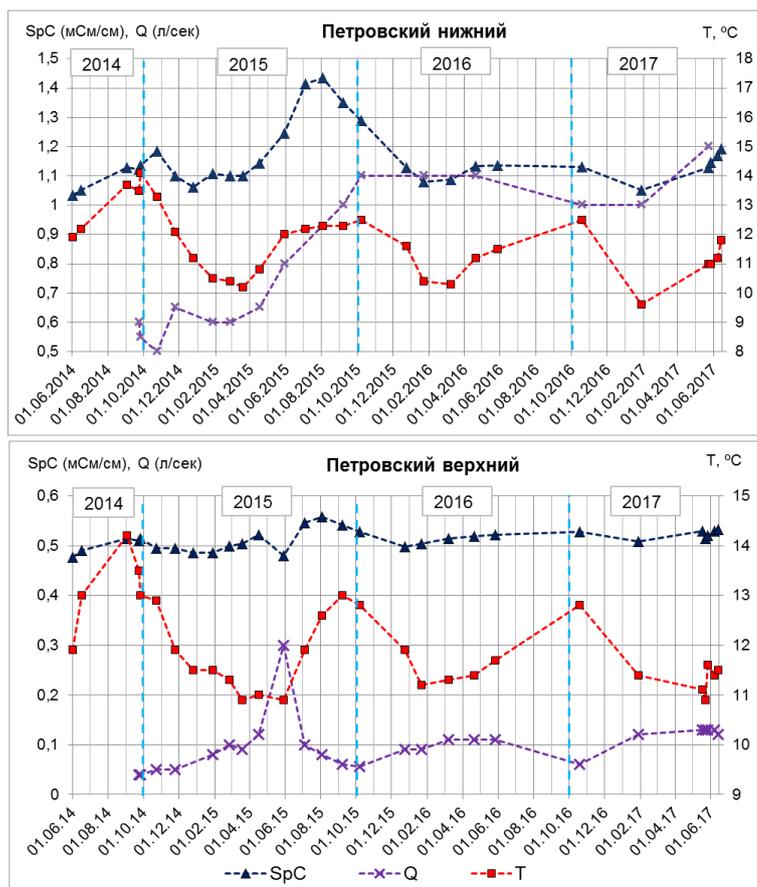


Рис. 5. Ход температуры (Т), удельной электропроводности (SpC) и расходов (Q) источников Петровский нижний (каптаж – верхняя панель) и Петровский верхний (нижняя панель) в течение срока наблюдений. Вертикальными пунктирными линиями показаны границы гидрологических лет.

Точные замеры расходов производились только по источнику «Петровский верхний». Он имеет наименьший расход среди всех наблюдаемых источников: в среднем 0,1 л/сек. В динамике его расхода отчетливо проявляется сезонная изменчивость: минимумы приходятся на начало и конец гидрологического года, максимум – на его середину с наиболее влажными месяцами. Отмечена быстрая реакция на обильное выпадение осадков. Так, максимум расхода в 0,3 л/сек в конце мая 2015 г. зафиксирован сразу после прохождения мощных ливней. Это подтверждает естественный характер питания источника «Петровский верхний» за счет выпадающих в области его питания осадков.

Изменение температуры воды находится в противофазе относительно динамики расходов: максимальные температуры наблюдаются в августе-сентябре, минимальные – в апреле-марте, реже (в 2016 г.) – в феврале-марте. Средняя температура 11,9 °С чуть ниже среднегодовой температуры воздуха. Амплитуда

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КАРСТОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ...

температуры составила 3,3 °С. В течение срока наблюдений отмечен линейный тренд снижения температур примерно на 1 °С, что согласуется с многолетним понижением средней температуры воздуха.

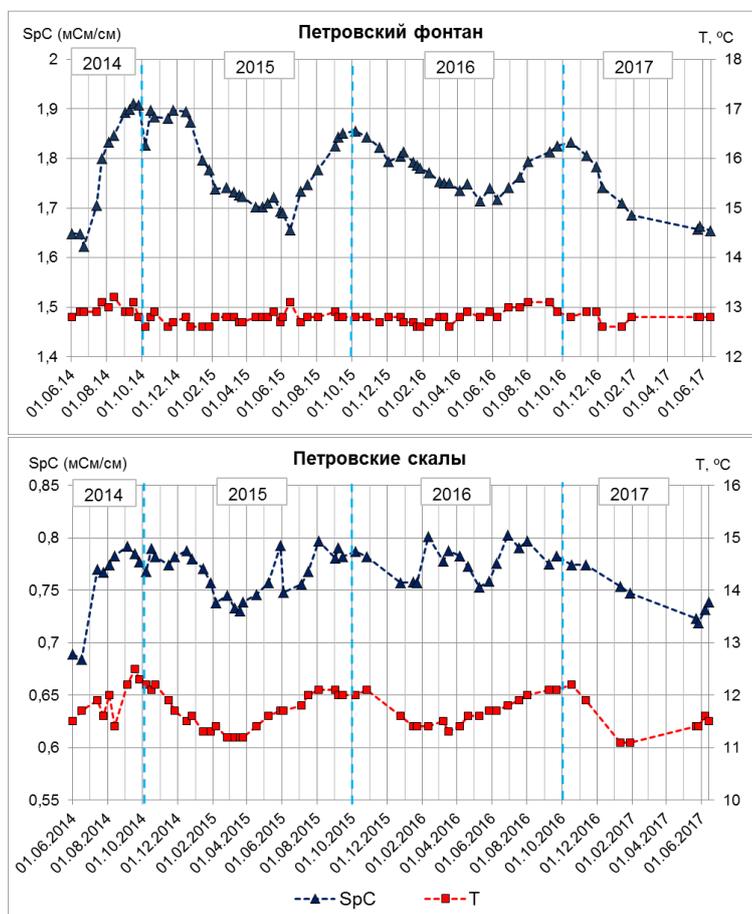


Рис. 6. Ход температуры (Т) и удельной электропроводимости (SpC) вод источника Петровский фонтан (верхняя панель) и основного источника на Петровских скалах (нижняя панель) в течение срока наблюдений. Вертикальными пунктирными линиями показаны границы гидрологических лет.

Источник «Петровский верхний» характеризуется наименьшей величиной минерализации (в среднем 0,333 г/л) в сравнении с другими источниками района, что согласуется с преимущественно его естественным питанием. Минерализация воды примерно повторяет ход температур. Коэффициент парной корреляции между расходами источника и температурой воды ($r = -0,67$). Остальные коэффициенты корреляции математической значимости не имеют. В ответ на обильные ливни происходит снижение температуры и минерализации воды, при довольно быстром

возврате к исходным значениям. Быстрый отклик на события в области питания может свидетельствовать о малых емкостных параметрах водоносной системы.

Таблица 1.
Средние, минимальные и максимальные значения показателей режима источников

Источник	Т, °С			TDS, г/л			Q, л/сек		
	средн	мин	макс	средн	мин	макс	средн	мин	макс
Петровский фонтан	12,8	12,6	13,2	1,16	1,06	1,24	2*	0,5*	5*
Петровский нижний (каптаж)	11,7	9,6	14,1	0,75	0,67	0,93	0,83	0,5	1,2
Петровские скалы	11,7	11,1	12,5	0,50	0,44	0,52	10*	5*	20*
Петровский верхний	11,9	10,9	14,2	0,33	0,31	0,36	0,1	0,04	0,3

*замер расхода производился приблизительно

Измерения параметров источника «Петровский нижний» изначально производились на каптаже, а затем на более мощном выходе подземных вод выше каптажа. Вода обоих выходов имеет практически идентичную температуру и электропроводимость, что дает основание относить их к одной водоносной системе. Точные измерения расходов производились для каптажа, для верхнего выхода расход оценивался приблизительно по потоку в русле. За период наблюдений отмечен рост расходов как по каптажу (с 0,5 л/с до 1,2 л/с), так и по верхнему выходу (с 5 до 10 л/с). Наибольший рост дебита отмечен во второй половине 2015 гидрологического года. Измерения в начале 2019 г. показали, что величина расхода увеличилась до 1,4 л/с и 15 л/с для каптажа и верхнего выхода соответственно. Сезонная цикличность расхода не выявлена. После обильных осадков отмечается увеличение расхода из верхнего выхода, которое через 1–2 недели сходит на нет.

Ход температуры воды источника «Петровский нижний» имеет четкую сезонность. Максимум температур (до 14 °С) наблюдается на стыке сентября и октября. В течение последующих 3–4 месяцев наблюдается охлаждение воды до 11 °С в феврале-марте. При среднем значении 11,7 °С амплитуда температур составила 4,5 °С, что выше, чем по всем остальным источникам. Линейный тренд хода температур, построенный по полученному ряду, имеет снижение на 1 °С.

В изменении минерализации также выявляется периодичность, однако, не такая четкая, как для температур. Максимумы минерализации приходятся на стыки гидрологических лет, однако они смещены относительно температурных максимумов в разные стороны на 1–2 месяца. На протяжении второй половины

2015 г. зафиксирован скачок минерализации до $TDS = 0,933$ г/л с гораздо большей амплитудой, чем в предыдущий и последующий годы. Средняя минерализация за срок наблюдений составило $0,752$ г/л. Существенной корреляции между рядами температуры и минерализации не выявлено.

Источник «Петровские скалы» на протяжении срока наблюдений имел расход без сезонной динамики $Q = 10$ л/с, в среднем, минимум – ~ 5 л/сек, максимум – ~ 20 л/с. Температуры имеет выраженную сезонность, сходную с предыдущими двумя источниками, но с меньшей амплитудой: всего $1,4$ °С при среднем $11,7$ °С. В минерализации сезонность также прослеживается, однако гораздо менее четкая. Средняя минерализация составила $\sim 0,5 \pm 0,08$ г/л. Отмечаются отдельные скачки, как правило, в весенне-летний период. В этой точке проводились разовые наблюдения небольшого источника, находящегося в 100 м южнее, примерно на той же высотной отметке. Он дренирует закарстованную трещину, параллельную той, из которой выходит основной источник. Его расход $\sim 0,2$ л/с и минерализация $0,36-0,37$ г/л. Значительное различие в минерализации указывает на разные условия формирования вод этих источников.

Источник «Петровский фонтан» имеет расход, в среднем, $2-3$ л/с, с редкими уменьшениями до $0,5$ л/с (с установлением отрицательных температур воздуха) и увеличениями до 5 л/с. Характерной чертой является практически постоянная температура воды, в среднем, $12,8$ °С, что примерно на 1 °С выше средних температур остальных источников и на $0,7$ °С выше средней температуры воздуха за срок наблюдений. Минерализация воды имеет хорошо выраженную сезонность – максимумы приходятся на август-октябрь, минимумы – на май-июнь. Источник имеет наибольшую минерализацию среди наблюдаемых: в среднем $1,16$ г/л. Высачивание из скальной стены над источником, дало сходное значение – $1,18$ г/л, что, скорее всего, указывает на единые условия формирования вод. В ходе наблюдений отмечено снижение амплитуд колебания минерализации, по годам $2014-2016$ – $0,2$ г/л, $0,12$ г/л и $0,08$ г/л соответственно.

Температурные ряды данных между источниками (кроме «Петровского фонтана») коррелируют в довольно высокой степени $r = 0,84-0,92$. Аномально стабильный режим температур «Петровским фонтаном» исключает его из общей группы. По кондуктометрическим рядам данных источники «Петровский нижний» и «Петровский верхний» имеют $r = 0,72$; «Петровский фонтан» и «Петровские скалы» $r = 0,69$; «Петровские скалы» и «Петровский нижний» $r = 0,45$ (немного ниже значимого).

Состав ионов. Выполненный анализ ионного состава основных водопроявлений дал следующие результаты. Вода источников «Петровский верхний» и «Петровский нижний» относится к сульфатно-гидрокарбонатному кальциевому типу, источника «Петровские скалы» – к сульфатно-гидрокарбонатному натриево-кальциевому, источника «Петровский фонтан» – к сульфатно-гидрокарбонатно-хлоридному кальциевому, колодца К5 – к хлоридно-гидрокарбонатному кальциевому.

Горизонт эоценовых известняков, таким образом, имеет довольно высокое содержание сульфатов, что нетипично для карстовых вод карбонатных коллекторов.

Грунтовые воды аллювиально-пролювиального горизонта из колодца К5, напротив, имеют низкое содержание сульфатов, но повышенное содержание хлоридов, также как воды источника «Петровский фонтан». В воде источника «Петровские скалы» повышено содержание ионов натрия и калия. В большинстве водопроявлений выявлено высокое содержание нитратов, превышающее (кроме источника «Петровский верхний») ПДК = 45 мг/л, что указывает на антропогенное загрязнение.

Сумма ионов, полученная лабораторным способом, в целом близка к расчетной минерализации TDS, полученной кондуктометрическим путем. Для показателей суммы ионов, общей жесткости, содержания нитратов и иона кальция были получены линейные зависимости от показателя удельной электропроводности SpC с довольно высокой степенью достоверности аппроксимации (Рис. 7). Таким образом, кондуктометрический метод представляется эффективным способом экспресс-анализа подземных вод изучаемого района.

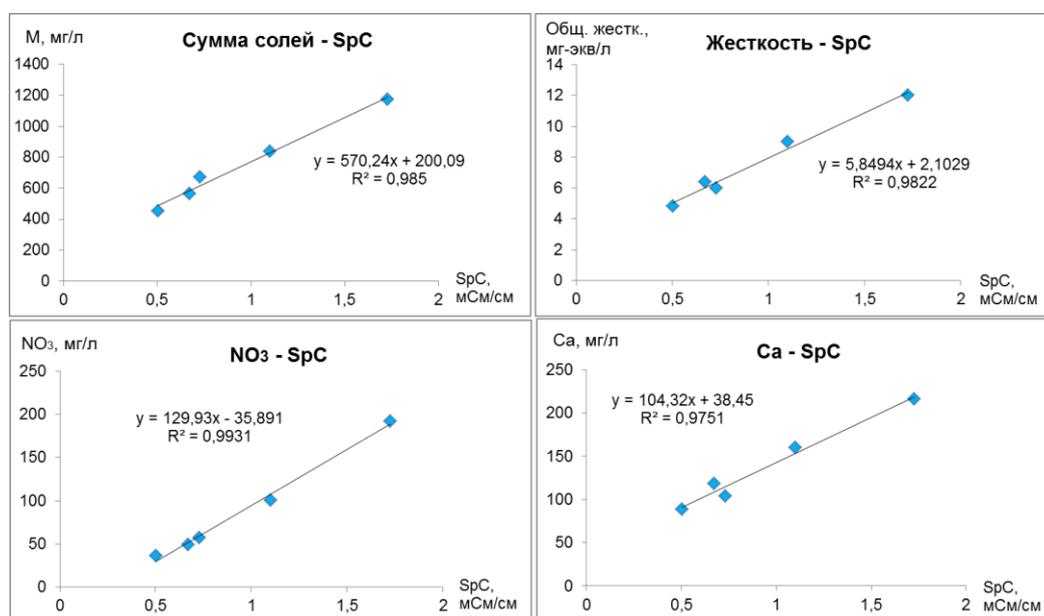


Рис. 7. Связь содержания отдельных ионов с удельной электропроводностью воды (SpC).

Воды аллювиально-пролювиального горизонта имеют закономерное увеличение минерализации в направлении от верховьев Петровской балки к ее устью. По воде колодцев выявлена линейная зависимость расчетной минерализации от высотной отметки точки опробования, описываемая уравнением:

$$y = - 0,007x + 2,91 \quad (R^2 = 0,96), \quad (1)$$

где x – абсолютная высотная отметка, м н.у.м., y – минерализация TDS, г/л.

Изотопный состав. Изотопный состав подземных вод (рис. 8) ложится вдоль локальной линии метеорных вод (ЛЛМВ [12]). Все пробы, за исключением одной, оказались изотопически легче среднемноголетнего состава атмосферных осадков, выпадающих в г. Симферополе. Это означает, что питание подземных вод происходит преимущественно за счет изотопически «легких» осадков холодного периода года, тогда как «тяжелые» осадки теплого периода большей частью расходуются на эвапотранспирацию [13].

Изменчивость изотопного состава во времени показана на рис. 9. За период наблюдений наименьшее содержание тяжелых изотопов имеют воды источников «Петровский верхний» $\delta^{18}\text{O} = -9,2 \text{ ‰}$ и $\delta^2\text{H} = -62 \text{ ‰}$ и «Петровский фонтан» $\delta^{18}\text{O} = -9,1 \text{ ‰}$ и $\delta^2\text{H} = -63 \text{ ‰}$. Более тяжелый состав имеют источники «Петровские скалы» $\delta^{18}\text{O} = -8,7 \text{ ‰}$ и $\delta^2\text{H} = -59 \text{ ‰}$ и «Петровский нижний» $\delta^{18}\text{O} = -8,7 \text{ ‰}$ и $\delta^2\text{H} = -61 \text{ ‰}$.

Изотопный состав вод последних двух источников (особенно источника «Петровский нижний») схож с составом воды из водопровода, что указывает на преобладающую роль водопроводных утечек в питании указанных источников. В динамике содержания в водах источников $\delta^{18}\text{O}$ проявляется синхронность на протяжении практически всего срока наблюдений. По содержанию $\delta^2\text{H}$ явная синхронность наблюдается только между источниками «Петровский верхний» и «Петровский фонтан».

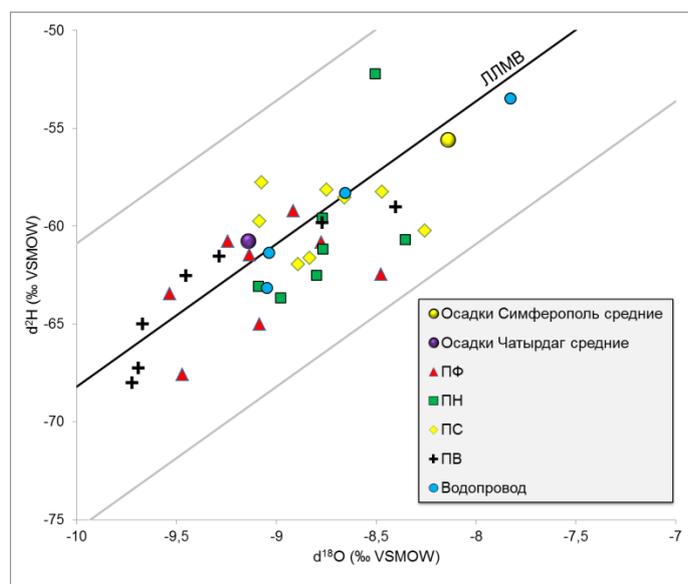


Рис. 8. Изотопный состав ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) вод источников на локальной линии метеорных вод (ЛЛМВ) для северного склона Крымских гор (ЛЛМВ взята из [12], построена по результатам опробований за период 2010–2014 г.). Серыми линиями показан «коридор» $\pm 1 \text{ ‰ } \delta^{18}\text{O}$.

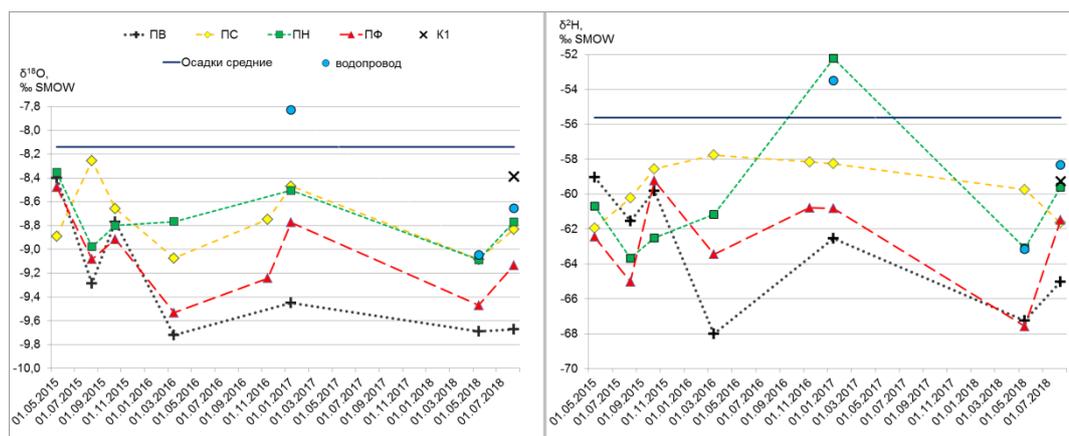


Рис. 9. Временные ряды изотопного состава ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) вод источников. Осредненный состав атмосферных осадков в Симферополе за период 2010–2014 г. по [12] (обозначения объектов по рис. 1).

Водный баланс. При величине естественной инфильтрации 46 мм/год [6], годовой объем подземного стока рассматриваемого водоносного горизонта в установленных границах должен составлять 152 тыс. м³/год (4,8 л/с). В реальности естественная инфильтрация, по-видимому, ниже, так как при ливневых осадках поверхностный сток по Петровской балке быстро выводит воду в русло р. Салгир.

Современный сток только по источникам «Петровский нижний» и «Петровские скалы» составляет 20–25 л/с, существенно превышая расчет. Учитывая, что они, очевидно, дренируют менее 50 % площади водосбора, можно сделать вывод, что их сток на ~80–90 % формируется из антропогенных источников питания. Это соображение подтверждается наблюдениями за химическими и изотопными трассерами, а также аномально стабильным и растущим во времени расходом источников.

Рассматриваемые источники имеют минерализацию в 2–3 раза выше, чем водопродная вода, и в 1,5–2 раза выше, чем сточные воды, а также характеризуются повышенным содержанием нитратов. Очевидно, значительная часть питания обусловлена децентрализованными бытовыми стоками. Последние имеют значительную агрессивность к вмещающим породам, что приводит к еще большему повышению их минерализации и существенному изменению в соотношении ионов.

Расположенный в верховье балки источник «Петровский верхний», имеющий по всем признакам исключительно естественное питание, позволяет оценить величину инфильтрации в ненарушенных условиях. На это указывает его низкая минерализация и «облегченный», по сравнению с другими источниками района, изотопный состав, сезонность динамики расхода с четкой реакцией на события обильных осадков. При площади водосбора ~0,07 км² и среднем расходе 0,1 л/сек расчетная инфильтрация составит ~45 мм/год, что совпадает с оценкой [6]. В ближайшее время область питания источника попадет в пределы строящегося

микрорайона «Петровские высоты», что позволит проследить техногенное воздействие.

Источник «Петровский фонтан» имеет наибольшую долю вклада бытовых стоков в химический состав (максимальные значения минерализации и содержания нитратов). В то же время, по изотопному составу он близок к источнику «Петровский верхний», имеющему питание за счет инфильтрации атмосферных осадков. Это предполагает смешанное естественно-антропогенное питание источника, что увязывается с прочими данными. В частности, повышение минерализации воды обусловлен, скорее всего, длительным временем контакта с известняками. На долгий путь фильтрации вод указывают их аномально стабильная температура и расход источника (с отсутствием реакции на ливневые выпадения). Водоносную систему, дренируемую источником, следует отнести к трещинно-пластовому типу.

ВЫВОДЫ

Мониторинг режима источников района Петровской балки, проведенный в течение 2014–2017 г., выявил следующие особенности.

Все наблюдавшиеся источники района, за исключением источника «Петровский верхний», имеют нарушенный режим, обусловленный их питанием из антропогенных источников: утечек из водопроводных систем, поливов приусадебных участков и бытовых стоков в связи с отсутствием канализационных коммуникаций. Нарушение режима отражается во внутригодовой стабильности расхода, повышенной минерализации и нитратном загрязнении. Одновременно, в многолетнем ряду наблюдений подземный сток постепенно увеличивается (например, источник «Петровский нижний» увеличил расход почти в 3 раза за три года). Преимущественно антропогенное питание источников фиксируется также по близости их изотопного состава (консервативная метка) к водопроводной воде. Для всех источников выявлена сезонная цикличность в ходе минерализации и температуры (за исключением источника «Петровский фонтан»): их максимальные значения наблюдаются в летне-осенний период, минимальные – в зимне-весенний. Доля антропогенного питания источников «Петровские скалы» и «Петровский нижний» оценивается на уровне 80–90%.

Для источника «Петровский верхний» естественный режим питания пока сохраняется. На это указывает 1) сезонность расходов, находящихся в противофазе с динамикой температуры и минерализации (время добегания от основной части области питания, исчисляется, по-видимому, несколькими месяцами); 2) наиболее легкий, среди остальных, изотопный состав воды источника соответствует преимущественному питанию в холодный период года. Таким образом, он может использоваться в качестве фонового объекта при мониторинге подземных вод изучаемого района.

Метод кондуктометрии показал высокую применимость для экспресс-определения как интегральных гидрохимических показателей (сумма ионов и общая жесткость), так и отдельных компонентов состава (содержание нитратов и иона кальция).

Мониторинг режима источников может быть использован как для фиксации текущего состояния подземных вод (с информированием населения), так и для количественной оценки антропогенного воздействия на них на фоне продолжающейся застройки территории.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Совета министров Республики Крым в рамках научных проектов 18-45-910007«р_а» и 19-45-910008 «р_а».

Список литературы

1. Амеличев Г.Н., Дмитриева А.Ю., Самохин Г.В. Гипогенный карст Симферополя (Предгорный Крым) и его эволюция // Спелеология и карстология. 2012. Вып. 8. С. 50–62.
2. Амеличев Г.Н. Формирование и режим карстовых вод в междуречье Большого и Малого Салгира (Симферополь, Республика Крым) // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2017. Т.3 (13). Вып. 2. С. 21–38.
3. 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. 2018. Том 4 (70). № 4. С. 251–267.
4. Амеличев Г.Н., Токарев С.В., Токарев И.В. Формирование и режим карстовых подземных вод в бассейне р. Абдалка (Предгорный Крым) // Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2019. Том 5 (71). № 2. С. 202–233.
5. Двойченко П.А. Геологические разрезы артезианских скважин г. Симферополя. Симферополь, 1927. 29 с.
6. Дублянская Г.Н., Дублянский В.Н. Теоретические основы изучения парагенезиса карст-подтопление. Пермь: Изд-во ПГУ, 1998. 204 с.
7. Кальфа Т.Ф. Экологическое состояние подземных вод Симферополя // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия «География». 2007. Т. 20 (59). № 2. С. 188–193.
8. Климчук А.Б., Тимохина Е.И., Амеличев Г.Н., Дублянский Ю.В., Шпётль К. Гипогенный карст Предгорного Крыма и его геоморфологическая роль. Симферополь: ДИАЙПИ, 2013. 203 с.
9. Важов В.И. Целебный климат. Симферополь: Таврия, 1979. 80 с.
10. Ведь И.П. Климатический атлас Крыма. Симферополь: Таврия-Плюс, 2000. 120 с.
11. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т.6. Украина и Молдавия, вып. 4. Крым. Л.: Гидрометеониздат, 1966. 343 с.
12. 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. Vol. 565. P. 61–73.
13. 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. 2012. № 9. С. 14–21.

**HYDROCHEMICAL AND HYDRODYNAMIC FEATURES OF KARST
GROUNDWATER IN THE SOUTH-EAST PART OF SIMFEROPOL UNDER
CONDITIONS OF ANTHROPOGENIC DISTURBANCE**

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

¹ V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Taurida Academy, Simferopol, Russian Federation

² Saint Petersburg University, Research Park, Saint Petersburg, Russian Federation

E-mail: tokcrimea@list.ru

The subject of this article is a monitoring of the groundwater resurgences within the Eocene cuesta of the Inner Ridge of the Crimean mountains between Salgir river and Petrovsky ravine (South-East part of Simferopol city). The goal of the work is to clarify the current conditions of recharge and discharge/exploitation of groundwater in the Petrovsky ravine area. Monitoring revealed the hydrodynamic, hydrochemical, isotopic and thermal conditions to determine the degree of anthropogenic transformation of the runoff. The results of observation form the basis for water-balance calculations and hydrogeological modeling of similar basins. They are also necessary for assessment of the condition of groundwater as an indicator of the pollution of the geological environment. Since the groundwater of the considered region are mainly of the karst type, the study of their regime is also important for assessment of the intensity of the karst process, which is an actual problem for urban areas.

Monitoring was carried out during the period of 2014-2017 years and includes the measurement of flow rates, temperature, electrical conductivity, analysis of ionic and isotopic ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) water composition. The main objects of observation are springs Petrovsky Fountain, Petrovsky Lower, Petrovsky Rocks and Petrovsky Upper. Despite a generally similar background, the regimes of individual springs have individual features of the time series of temperatures, mineralization and isotopic composition of waters.

All the observed springs of the area, with the exception of the Petrovsky Upper spring, have a disturbed regime due to their recharge from anthropogenic sources: leaks from water supply systems, irrigation of household plots and domestic wastewater due to the lack of sewer communications. Disturbance of the regime is reflected in intra-annual stability, increased mineralization and nitrate pollution. At the same time, in the long-term series of observers, the underground flow is gradually increasing. So, for example, the spring "Petrovsky Lower" increased discharge by almost 3 times in three years.

Mostly anthropogenic recharge of the observed springs is also determined by the proximity of their isotopic composition to the tap water. For all springs, seasonal variability was revealed in time series of their mineralization and temperature: maximum values are observed in the summer-autumn period, and the minimum values are observed in the winter-spring period. An exception is the Petrovsky Fountain spring, the temperature regime of which does not have seasonal variability. The contribution of anthropogenic sources in recharge of the springs Petrovsky Rocks and Petrovsky Lower is estimated at 80–90%.

The Petrovsky Upper spring still preserves its natural recharge regime. Thus, it can be used as an object for background monitoring of groundwater of the study area.

The conductometry method showed high applicability for express determination of both integral hydrochemical parameters (total dissolved solids and total hardness) and individual components of the composition (content of nitrates and calcium ion).

Monitoring of the springs regime can be used both to reveal the current condition of groundwater and to quantify the anthropogenic impact on them under conditions of ongoing development of the territory.

Keywords: groundwater, karst spring, Simferopol, specific conductivity, seasonality, anthropogenic recharge, water pollution, isotopic composition, disturbed regime.

References

1. Amelichev G.N., Dmitrieva A.Ju., Samokhin 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).
2. Amelichev G.N. Formirovanie i rezhim karstovyh vod v mezhdurech'e Bol'shogo i Malogo Salgira (Simferopol', Respublika Krym) (Formation and regime of karst waters in the interfluvium of the Large Salgir and the Small Salgir rivers (Simferopol, Crimea). *Geopolitika i ekogeodinamika regionov*, 2017, vol. 3 (13), no 2, pp. 21–38. (In Russian).
3. Amelichev G.N. Podzemnye karstovye vody v verhnem techenii r. Abdalka (Simferopol', Predgornyj Krym) (Karst groundwater in the upper reach of Abdalka river (Simferopol, the Crimean Piedmont). *Uchjonye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografija. Geologija*, 2018, vol. 4 (70), no 4, pp. 251–267. (In Russian).
4. Amelichev G.N., Tokarev S.V., Tokarev I.V. Formirovanie i rezhim karstovyh podzemnyh vod v bassejne r. Abdalka (Predgornyj Krym) (Formation and regime of karst groundwater in the basin of Abdalka river (Piedmont Crimea). *Uchjonye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografija. Geologija*, 2019, vol. 5 (71), no. 2. pp. 202–233. (In Russian).
5. Dvojchenko P.A. Geologicheskie razrezy artezijskih skvazhin g. Simferopolja (Geological cross-sections of artesian boreholes of Simferopol), Simferopol, 1927, 29 p. (In Russian).
6. Dubljanskaya G.N., Dubljansky V.N. Teoreticheskie osnovy izuchenija paragenezisa karst-podtoplenie (Theoretical bases of karst-flooding paragenesis study). Perm': PSU (Publ.), 1998, 204 p. (In Russian).
7. Kal'fa T.F. Ekologicheskoe sostojanie podzemnyh vod Simferopolja (Ecological condition of groundwater of Simferopol). *Uchjonye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografija. Geologija*, 2007, vol. 20 (59), no 2, pp. 188–193. (In Russian).
8. Klimchouk A.B., Tymokhina E.I., Amelichev G.N., Dublyansky Y.V., Spötl C. Gipogennyj karst Predgornogo Kryma i ego geomorfologicheskaja rol' (The hypogene karst of the Crimean Piedmont and its geomorphological role), Simferopol, DIP (Publ.), 2013, 203 p. (In Russian).
9. Vazhov V.I. Celebnyj klimat (Healing climate). Simferopol: Tavria (Publ.), 1979, 80 p. (In Russian).
10. Ved' I.P. Klimaticheskij atlas Kryma (Climatic atlas of Crimea), Simferopol, Tavria-Plus, 2000, 120 p.
11. Resursy poverhnostnyh vod SSSR. T.6. Ukraina i Moldavija, vyp. 4. Krym (Resources of surface water of the USSR. V.6. Ukraine and Moldova. Iss.4. Crimea), Leningrad, Gydrometeoizdat, 1966, 343 p.
12. 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, vol. 565, pp. 61–73.
13. Dubljansky Y.V., Klimchouk A.B., Amelichev G.N., Tokarev S.V., Spötl C. Izotopnyj sostav atmosferyh osadkov i karstovyh istochnikov severo-zapadnogo sklona Krymskih gor (Isotopic composition of atmospheric precipitation and karst springs of the North-Western slope of the Crimean mountains). *Speleologija i karstologija*, 2012, no 9, pp. 14–21. (in Russian).