

ПРОБЛЕМЫ ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ АРИДНЫХ РЕГИОНОВ

УДК 551.44

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГИДРОГЕОЛОГИИ КАРСТА КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА

© 2022 г. Б. А. Вахрушев^а, Г. Н. Амеличев^а, С. В. Токарев^{а, *}, Г. В. Самохин^а

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

*e-mail: tokcrimea@list.ru

Поступила в редакцию 13.12.2021 г.

После доработки 20.01.2022 г.

Принята к публикации 21.01.2022 г.

Крымский п-ов, 84% территории которого сложено растворимыми породами, — регион широкого распространения и разнообразного проявления карста. Практически все подземные воды Крыма связаны с карстовыми водоносными горизонтами, которые характеризуются рядом гидрогеологических особенностей: высокие концентрация и скорости движения подземных вод, очаговый характер разгрузки, несовпадения подземных водосборов с поверхностными и другие. Раскрыты основные проблемы гидрогеологии карста Крымского п-ова, среди них — идентификация эволюционно-генетических типов карста, определение буферной функции эпикарстовой зоны, установление водосборных границ крупных карстовых источников, оценка объемов субмаринной разгрузки карстовых вод и их использование, обоснование зон санитарной защиты для карстовых водозборов, сложности численного гидрогеологического моделирования в условиях карста. Для их решения предложен комплекс работ, включающих систематические эксперименты по мультитрассированию карстовых вод, режимные наблюдения в областях питания и на контурах разгрузки карстовых водоносных систем. Обязательное условие правильной интерпретации полученных данных — использование современных спелеогенетических концепций.

Ключевые слова: карст, подземные воды, Крымский полуостров, трассирование, субмаринная разгрузка, уязвимость.

DOI: 10.31857/S0321059622040186

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время стратегическая задача для обеспечения устойчивого развития Крымского региона — эффективное управление водными ресурсами и поиск новых источников водоснабжения. Карст — один из ведущих гидрогеологических процессов на Крымском п-ове. Новые теоретические подходы к проблеме картирования и типизации закарстованных территорий [3, 6, 10] позволили увеличить учетную площадь территорий развития карста в Крыму до 21.3 тыс. км² (84% площади полуострова). Наличие карстующихся пород на поверхности или в недрах той или иной территории приводит к существенному изменению ее гидрологических, гидрогеологических и инженерно-геологических свойств.

Карстовые массивы Главной гряды Крымских гор — область питания крупнейших природных источников (Карасу-Баши, Скельского, Аянско-го, Пании и др.) и всех крупных водохранилищ полуострова, используемых для питьевого водоснабжения (в частности, Чернореченского, Пар-

тизанского и др.). От ресурсов карстовых подземных вод, формирующихся в пределах Главной гряды, критически зависит водоснабжение городов Симферополя, Севастополя, Ялты, Бахчисарая, Белогорска, с недавнего времени — Керчи, Феодосии и Судака, а также питание артезианских водоносных горизонтов Предгорного и значительной части Равнинного Крыма. Кроме того, все поверхностные водотоки, берущие начало в Горном Крыму, относятся к малым рекам карстового питания.

Цель данной работы — освещение основных проблем карстовой гидрогеологии Крыма с предложением путей их решения. Для этого прежде всего необходимо выполнить анализ степени изученности карста Крыма. Выявление основных проблем гидрогеологии карста в данном регионе позволит наметить актуальные направления дальнейших гидрогеологических исследований и предложить подходы к эффективной охране и рациональному использованию ресурсов карстовых вод полуострова.

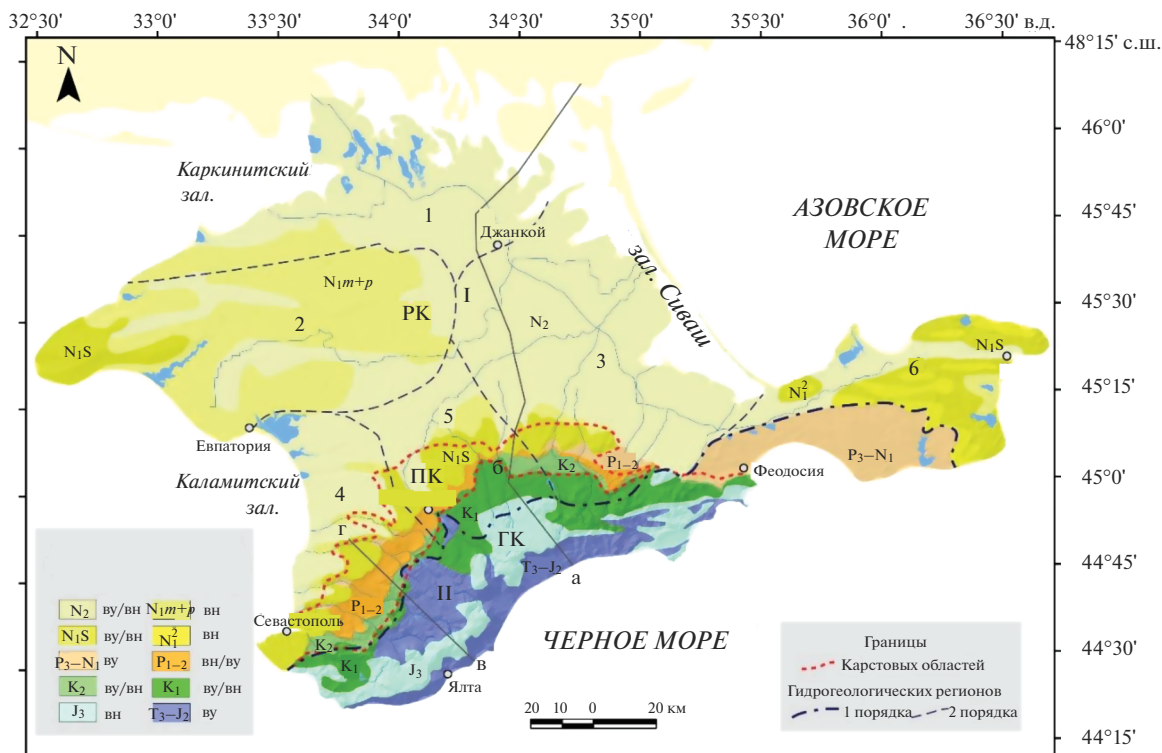


Рис. 1. Картолого-гидрогеологическая схема Крымского п-ова. Карстовые области (по Б.А. Вахрушеву [3], красные заглавные буквы): РК – Равнинно-Крымская, ПК – Предгорно-Крымская, ГК – Горно-Крымская. Гидрогеологические регионы 1-го порядка (по В.М. Шестопалову и др. [31], римские цифры): I – Причерноморский артезианский бассейн, II – Горно-Крымская гидрогеологическая область. Гидрогеологические регионы 2-го порядка в Равнинном Крыму (по Лушику и др. [24], арабские цифры): 1 – Северо-Сивашский, 2 – Новоселовский, 3 – Белогорский, 4 – Альминский, 5 – Симферопольский, 6 – Керченская область малых артезианских бассейнов. Линии а–б и в–г соответствуют гидрогеологическим разрезам на рис. 2.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ КАРСТОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В КРЫМУ

В таксономическом отношении Крым расположен в пределах Крымско-Кавказской и Восточно-Европейской карстовых стран, относится к карстовым провинциям Горного Крыма и Скифской плиты, в которых выделяются Горно-Крымская, Предгорно-Крымская и Равнинно-Крымская карстовые области (рис. 1).

Карстовые коллекторы подземных вод полуострова относятся к двум гидрогеологическим структурам 1-го порядка: гидрогеологической складчатой области Горного Крыма и Причерноморскому артезианскому бассейну [31]. В гидрогеологической области Горного Крыма (соответствует Горно-Крымской карстовой области) практически все ресурсы подземных вод содержатся в интенсивно закарстованных карбонатных породах верхнеюрского и, частично, нижне-мелового возраста. Механизм формирования вод здесь – исключительно автогенный, за счет выпадающих осадков в пределах открытых карстовых водосборов Главной гряды (инфильтрационный и инфлюационный типы питания), а также кон-

денсации в недрах карстовых массивов. Подавляющая часть ресурсов подземных вод Горного Крыма разгружается на поверхность через карстовые источники на склонах массивов, откуда берут начало крупнейшие реки полуострова. По оценкам И.Г. Глухова и Н.И. Дрозда, карстовое питание рек Главной гряды Крымских гор составляет >50% их общего стока [4].

В части Причерноморского артезианского бассейна, относящейся к Равнинному и Предгорному Крыму, наибольшее значение для питьевого водоснабжения имеют водоносные комплексы в трещиноватых и закарстованных известняках палеогенового и неогенового возраста (рис. 2). Их краевая область питания – Предгорный Крым, где восполнение ресурсов подземных вод происходит главным образом за счет поглощения руслового стока в местах пересечения реками предгорных гряд. Часть подземного стока восточных карстовых массивов Главной гряды (Долгоруковский, Карабийский, Агармышский) ввиду их плавного погружения на С под отложения более молодого возраста также напрямую участвует в питании артезианского бассейна. Таким образом,

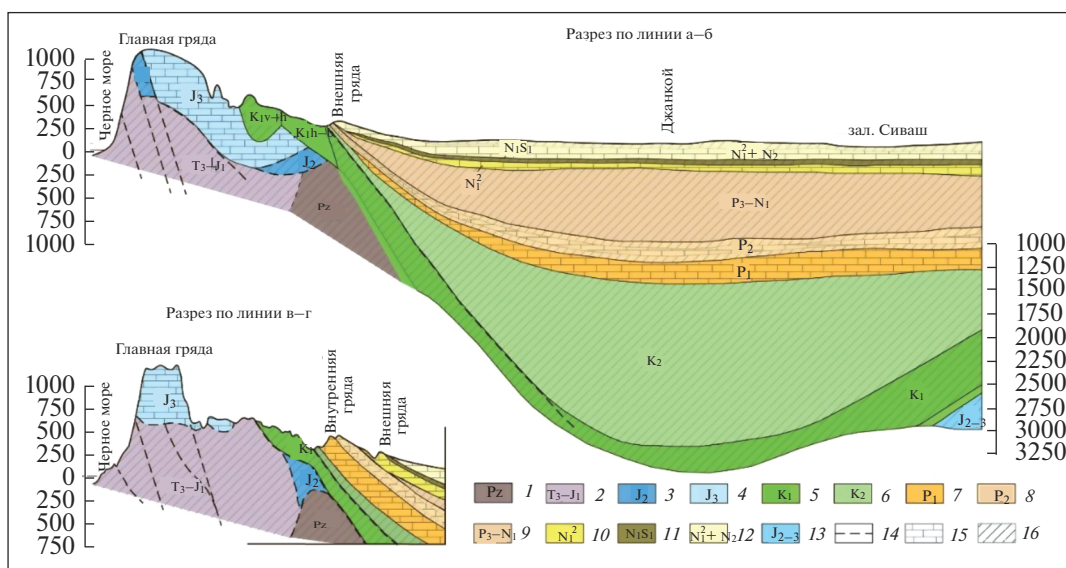


Рис. 2. Упрощенные гидрогеологические разрезы Крымских гор и Равнинного Крыма по линиям а–б и в–г (см. рис. 1): 1 – палеозойские метаморфизированные породы, 2 – флишевые отложения верхнего триаса – нижней юры (таврическая серия), 3 – песчано-глинистые и конгломератовидные породы средней юры, 4 – закарстованные известняки верхней юры с трещинно-карстовыми водами, 5 – песчаники, конгломераты и известняки нижнего мела, 6 – известняки и мергели верхнего мела, 7 – известняки и мергели палеоцена, 8 – известняки и мергели эоцена, 9 – глины олигоцен-нижнего миоцена (майкопская серия), 10 – пески и известняки среднего миоцена, 11 – глины нижнего и среднего сармата, 12 – известняки и пески верхнего миоцена и плиоцена с глинами сверху, 13 – песчано-глинистые отложения предположительно средней и верхней юры с трещинно-пластовыми водами, 14 – линии тектонических разрывов, 15 – водоносные комплексы и горизонты в закарстованных карбонатных породах, 16 – водоупорные пласты. Разрез по линии а–б построен по С.Л. Пугач [5] с переработкой авторов, разрез по линии в–г заимствован из [38] с переработкой авторов.

ресурсы основных эксплуатационных водоносных горизонтов равнинной части полуострова формируются при ведущем участии карстовых водосборов Горного Крыма. Однако объем этого питания достоверно не установлен в связи со сложностью гидрогеологических условий сочленения области питания Горного Крыма с артезианским бассейном Равнинного Крыма. Ранее оценка ресурсов и темпов водообмена в сармат-эоцено-понтическом водоносном комплексе – основном эксплуатационном в Равнинном Крыму – проводилась на основе постоянно действующей гидрогеологической модели [33]. Согласно ее результатам, средний темп водообмена в комплексе равен 1800 лет, а наиболее интенсивный водообмен происходит в его юго-западной части (Альминский бассейн), где за счет латерального водопоступления с предгорий он составляет 150 лет.

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЗАКАРСТОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

В подходах к решению проблемы эффективно и устойчивого использования подземных и поверхностных источников водоснабжения региона до настоящего времени практически не учитывается карстовая природа подземных водоносных систем Горного, Предгорного и Равнинного

Крыма, а также гидрологические особенности рек карстового питания, составляющих подавляющее большинство поверхностных водотоков полуострова. Основные отличия карстовой и традиционной (некарстовой) гидрогеологии и гидрологии заключаются в следующем.

1. Для карстовых районов важнейший гидрологический фактор – несовпадение поверхностных и подземных водосборов, что требует применения особых методик для проведения водно-балансовых работ, особенно при гидротехническом строительстве, поиске и оценке ресурсов карстовых вод. В классической гидрогеологии и гидрологии основные показатели (слой стока, коэффициент стока, модуль стока и др.) прямо или косвенно учитывают в расчетах площадь поверхностно-топографического водосбора. При этой методике не учитываются возможные перетоки карстовых вод из соседних и более удаленных бассейнов или наоборот – из данного бассейна в смежные, что приводит к ошибкам в расчетных показателях. Например, построенное водохранилище или будет терять свой расчетный объем в связи с инфильтрацией воды в трещинно-карстовые пустоты, или при дополнительных водоприитоках через карстовые источники необходимо будет производить технические попуски, формируя ниже плотины техногенные паводки, что неодно-

кратно происходит в крымских реалиях. Этот факт должен учитываться в первую очередь при создании моделей взаимодействия поверхностных и подземных вод для речных бассейнов, выбранных в качестве репрезентативных.

2. Для карстовых районов характерна высокая пространственная неоднородность и анизотропия емкостных и фильтрационных свойств вмещающих пород и, как следствие, высокая степень концентрации и локализации подземного стока. Специфическая особенность карстовых коллекторов подземных вод — их многоуровневая пустотность и проницаемость (двухуровневая, иногда трехуровневая) порового, трещинного и канального типов. Расчеты группы зарубежных специалистов [43] позволяют сделать вывод о вкладе каждого из типов пустотности и проницаемости в подземный сток карстовых водоносных горизонтов (в безнапорных условиях). При том, что канальная пустотность обычно составляет всего от сотых долей до нескольких процентов общей пустотности, а поровая пустотность обычно >90%, водопроницаемость каналов на несколько порядков выше водопроницаемости других сред. Таким образом, именно канальная проницаемость обеспечивает почти весь (94–99%) подземный сток карстовых коллекторов [18].

3. Для карстовых районов характерен очаговый тип питания и разгрузки подземных вод. В многочисленных карстовых воронках и понорах замыкается поверхностная концентрация стока на горных плато. Такие малые реки, как Суботхан, Абдалка, Казанка, полностью поглощаются в недра на коротких участках русла, другие — теряют до 50% стока при пересечении карстовых участков. В Крыму источников со среднемноголетним расходом <0.2 л/с подавляющее большинство (>2000), но они суммарно дают всего 3 млн м³ в год, а 75 источников со среднемноголетним расходом >10 л/с дают 272 млн м³ в год. В целом, годовой сток всех источников >330 млн м³. Это показывает: при том, что в маловодный год поверхностный сток Крыма составляет 450 млн м³, а в многоводный достигает 950 млн м³ [10] — в засуху работает исключительно карстовая гидрогеология.

4. Для карстовых районов характерны очень высокие скорости движения подземных вод (и, соответственно, загрязнений при их попадании в водоносную систему). Скорости “добегания” индикатора от области питания до очагов разгрузки измеряются сотнями и тысячами метров в сутки, тогда как в обычных некарстовых коллекторах они в сотни и тысячи раз меньше. Результаты экспериментов по трассированию карстовых подземных вод в Горном Крыму показали, что средняя скорость их движения составляет 3350 м/сут [11]. Однако эту оценку, по мнению В.Н. Дублян-

ского [8], следует считать заниженной, поскольку регистрация времени прихода трассеров в пункты наблюдений в большинстве экспериментов была малодискретной (обычно раз в 4 дня), а эксперименты далеко не всегда проводились в периоды высокой обводненности. Вместе с тем новейший эксперимент, проведенный в 2019 г. на Долгоруковском массиве в условиях низкой водности, показал значительно меньшие скорости — всего 150–190 м/сут [28]. Примерно такие же скорости получены по результатам эксперимента на Долгоруковском массиве в 1964 г., проводившегося в осеннюю межень. Такие вариации скоростей движения карстовых вод указывают на кардинальные различия гидродинамических условий карстовых водообменных систем и целых массивов в зависимости от сезона и водности.

5. Для карстовых вод характерна крайне низкая способность к самоочищению и рассеиванию загрязняющих веществ. Это связано с рядом факторов: а) высокими скоростями движения карстовых вод; б) высокой канализованностью подземных водотоков; в) низкой адсорбционной способностью вмещающих пород; г) слабой элиминирующей способностью к загрязнителям разного класса. В связи с этим карстовые воды особенно чувствительны к загрязнителям разных типов и видов — загрязнители практически сразу, не видоизменяясь, поступают из области питания к области разгрузки или в пункты водозабора. Этот факт кардинально меняет методику оценки уязвимости карстовых вод к загрязнителям и вместе с этим — подходы к установлению границ водозащитных зон.

Таким образом, при гидрогеологических исследованиях карстовых районов критически важна адекватная характеристика канальной проницаемости, которая может быть достигнута с применением комплекса методов, обязательно включающего в себя анализ спелеологических данных, эксперименты по мультитрассированию карстовых вод, инвентаризацию очагов разгрузки и изучение их режима. Решающее значение для правильной интерпретации получаемой информации имеет применение современных спелеогенетических концепций [41].

СОВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИОННО-ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ТИПОЛОГИЯ КАРСТА И ЕЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ

Важное значение в решении проблем карстовой гидрологии и гидрогеологии имеют современные представления об эволюционно-генетических типах карста и их гидрогеологическом функционировании. За несколько последних десятилетий в отечественной карстологии, развивающейся на стыке геолого-геоморфологических и гидролого-гидрогеологических наук, наблюдает-

ся смещение акцентов в изучении карста от первой группы ко второй. Среди новейших теоретических разработок в Крыму получила развитие генетическая концепция, согласно которой выделяется два основных типа карста – эпигенный и гипогенный [17, 19].

Эпигенный карст

Эпигенный карст формируется в приповерхностных горизонтах растворимых пород под влиянием свободных нисходящих поверхностных вод. Большинство его классических карстологических и спелеогенетических моделей, созданных в XX в., были построены для открытых гидрогеологических условий и основаны на представлениях о формировании каналовых систем в зоне полного насыщения за счет поверхностного питания с вышележащих или смежных площадей. Развитие фреатических каналов в толще растворимых пород сопровождается конкуренцией за расход и поверхностное питание, что обуславливает возрастание концентрированности последнего и тесную генетическую связь между спелеогенезом и поверхностным карстовым морфогенезом. При активном росте конкурентноспособных каналов питания становится недостаточным. Напор, а затем и свободная поверхность подземных вод постепенно снижаются до уровня базиса дренирования. Осушившиеся фреатические каналы какое-то время развиваются в зоне аэрации, а затем разрушаются и/или заполняются аккумулятивным материалом. Для эпигенного карста характерны высокие внутригодовые вариации расхода карстовых источников, относительно быстро отклиkaющиеся на изменения синоптической ситуации на поверхности, преобладание изолированных водотоков в недрах.

Особую гидрогеологическую роль в эпигенном карсте играет так называемая эпикарстовая зона, пространственно коррелирующая с корой выветривания карстовых массивов. Эпикарстовая зона в сравнении с другими гидродинамическими зонами характеризуется более равномерной и высокой проницаемостью и значительными емкостными свойствами. Она получает главным образом инфильтрационное и конденсационное питание, имеет изменчивую мощность в пределах от нескольких до десятков метров и содержит безнапорные воды, обычно образующие подвешенный водоносный горизонт. Эпикарстовая зона имеет изменчивые запасы и играет регулируемую роль в режиме карстовых водообменных систем, задерживая и распределяя инфильтрационное питание с поверхности. В пределах эпикарстовой зоны перед входом в нижележащую зону аэрации происходит разделение площадной инфильтрации на две компоненты: быстрая фильтрация (воды, дренируемые из эпикарстового го-

ризонта крупными трещинами и нарушениями, обычно преобразованными в подэпикарстовые шахты) и медленная фильтрация (воды, дренируемые из эпикарстового горизонта мелкими трещинами). Морфогенетические процессы эпикарста – определяющие в образовании карстовых воронок на поверхности. Последние однозначно маркируют зоны быстрой фильтрации [15, 19].

Из этого следует важнейший вывод, который ранее не учитывался в гидрологии карста, – эпикарстовая зона выполняет важную буферную функцию по отношению к подземным водам vadозной и фреатической зон, препятствуя быстрому прохождению в них загрязнителей и растягивая во времени сработку динамических запасов карстовых вод. На это также указывают результаты изотопных исследований, проводимых на карстовых массивах Горного Крыма в последнее десятилетие [37, 38]. Так, выяснено, что при прохождении атмосферных осадков через карстовый массив приходящий от них изотопный сигнал ($\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$), имеющий “на входе” высокую вариацию ($\delta^2\text{H} = -117...-7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -16...-2\text{‰}$), существенно стабилизируется уже в эпикарстовой зоне ($\delta^2\text{H} = -95...-57\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -13...-8\text{‰}$). Крупные карстовые источники, дренирующие фреатическую зону, имеют практически неизменный изотопный состав вне зависимости от уровня водности ($\delta^2\text{H} = -72...-60\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -10.5...-9\text{‰}$).

Таким образом, атмосферные осадки, приходящие на поверхность карстового массива, внутри него проходят через два “выравнивающих” буфера: 1 – эпикарстовая зона с подвешенным водоносным горизонтом, 2 – фреатическая зона с основным горизонтом карстовых вод. В то же время проблемным вопросом остается определение емкостных параметров и водоудерживающей способности эпикарстовой зоны, без чего невозможно построение количественных геофильтрационных и геомиграционных моделей карстовых массивов.

Гипогенный карст

Понятие о гипогенном карсте сформировалось в научной литературе в течение двух последних десятилетий. Если ранее глубинные карстовые полости, находящиеся в гидрогеологически закрытых условиях, обычно трактовались как палеокарстовые формы, сформированные в эпигенных условиях былых эпох, то в последнее время в мировой карстологии происходит осознание их гипогенного происхождения и широко распространения гипогенного карста, определяемого как процесс образования макропустотности в гидрогеологически закрытых (полузакрытых) условиях с питанием от подстилающих толщ [17,

40, 42]. Гипогенный спелеогенез связан с режимами восходящей разгрузки региональных и промежуточных систем стока и с поперечным водообменом между горизонтами в слоистых напорных водоносных комплексах. Теория гипогенного спелеогенеза наиболее полно разработана для слоистых артезианских систем платформенного типа, однако ее ключевые положения также применимы к обстановкам восходящей разгрузки в тектонически активных зонах Горного, Предгорного и Равнинного Крыма, где каналовые системы гипогенного генезиса обеспечивают эффективную гидродинамическую связь между региональными водоносными горизонтами [22].

Анализ эволюции крымского карста позволяет выделить на территории полуострова три крупных региона, отличающихся друг от друга по гидрогеологическим и геолого-геоморфологическим условиям. Равнинный Крым представляет собой регион с преобладанием платформенных структур и бассейновой организацией водообменных комплексов. Здесь развит активный гипогенный спелеогенез, сопровождающийся проявлениями гидротермии, гидрохимическими, газовыми и изотопными аномалиями, но нет доступных полостных форм. Горный Крым — регион с давней историей карстообразования, который еще в мелпалеогеновое время пережил этап гипогенного развития, а в течение неоген-четвертичной эпохи его карстовые системы осуществили переход и стали функционировать на основе механизма эпигенного спелеогенеза. Предгорный Крым, занимая промежуточное положение, характеризуется переходными условиями, в которых гипогенные формы уже утратили свою гидрогеологическую активность, перешли в реликтовое состояние и относительно недавно были вскрыты или продолжают вскрываться на поверхности [1, 2].

ПРОБЛЕМА ЧИСЛЕННОГО ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В КАРСТОВЫХ РАЙОНАХ И ИНДИКАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Указанные выше гидрогеологические особенности закарстованных коллекторов подземных вод сильно ограничивают применимость метода математического моделирования для решения практических задач. Как справедливо указывает А.Б. Климчук [18], основная проблема при этом — сложность адекватной количественной характеристики фильтрационных параметров в условиях их крайне высокой неоднородности и анизотропии. Достоверность математических моделей стока в условиях карста понижается с увеличением масштаба моделирования, т. е. с уменьшением размера моделируемой области. Поэтому боль-

шие шансы на успешную реализацию имеют региональные модели, либо модели, построенные в масштабе отдельных карстовых водоносных систем (карстовых бассейнов). Успешность таких моделей зависит главным образом от точности оценки каналовой проницаемости, что возможно с использованием метода индикаторных экспериментов — трассирования карстовых водоносных систем.

Трассирование подземных вод в карстовых районах позволяет достоверно решать следующие задачи:

- определять, что вода (и загрязнитель) движется от одной точки (очага питания, места потенциального или реального загрязнения) к другой точке (промежуточные водозаборные сооружения, крупные источники и водозаборы подземных вод);

- определять действительные скорости и расстояния движения подземных вод;

- трассировать распространение загрязненных вод от потенциального или актуального источника загрязнения, определять гидравлические связи мест локализации загрязнения с водоносными горизонтами, источниками и водозаборами подземных вод;

- определять зоны и места утечек из водохозяйственных и гидротехнических сооружений;

- определять границы областей питания и устанавливать обоснованные охранные зоны подземных источников и водозаборов;

- проводить поиск и оценку ресурсов карстовых подземных вод на основе установления гидравлических связей между областями питания, транзита и разгрузки;

- определять емкостные и фильтрационные параметры карстовых коллекторов подземных вод;

- проводить водно-балансовые работы в карстовых районах.

В 1960–1980-е гг. в карстовой области Горного Крыма было проведено более 30 индикаторных экспериментов [8, 11]. Еще несколько экспериментов было выполнено в 2000-е гг. [9, 28]. В качестве индикатора во всех случаях использовался флуоресцеин. Полученные результаты указывают на центробежный характер растекания карстовых подземных вод (рис. 3).

Следует отметить, что результаты проведенных ранее в Горном Крыму индикаторных опытов следует использовать с осторожностью. Проведенные эксперименты имели полуколичественный характер. Как известно, степень их надежности уменьшается с увеличением количества экспериментов, проведенных на одном массиве. Это объясняется задержкой красителя в изолированных подземных резервуарах, его оседанием на стенках карстовых полостей и трещин с последующим выносом в карстовые источники с павод-

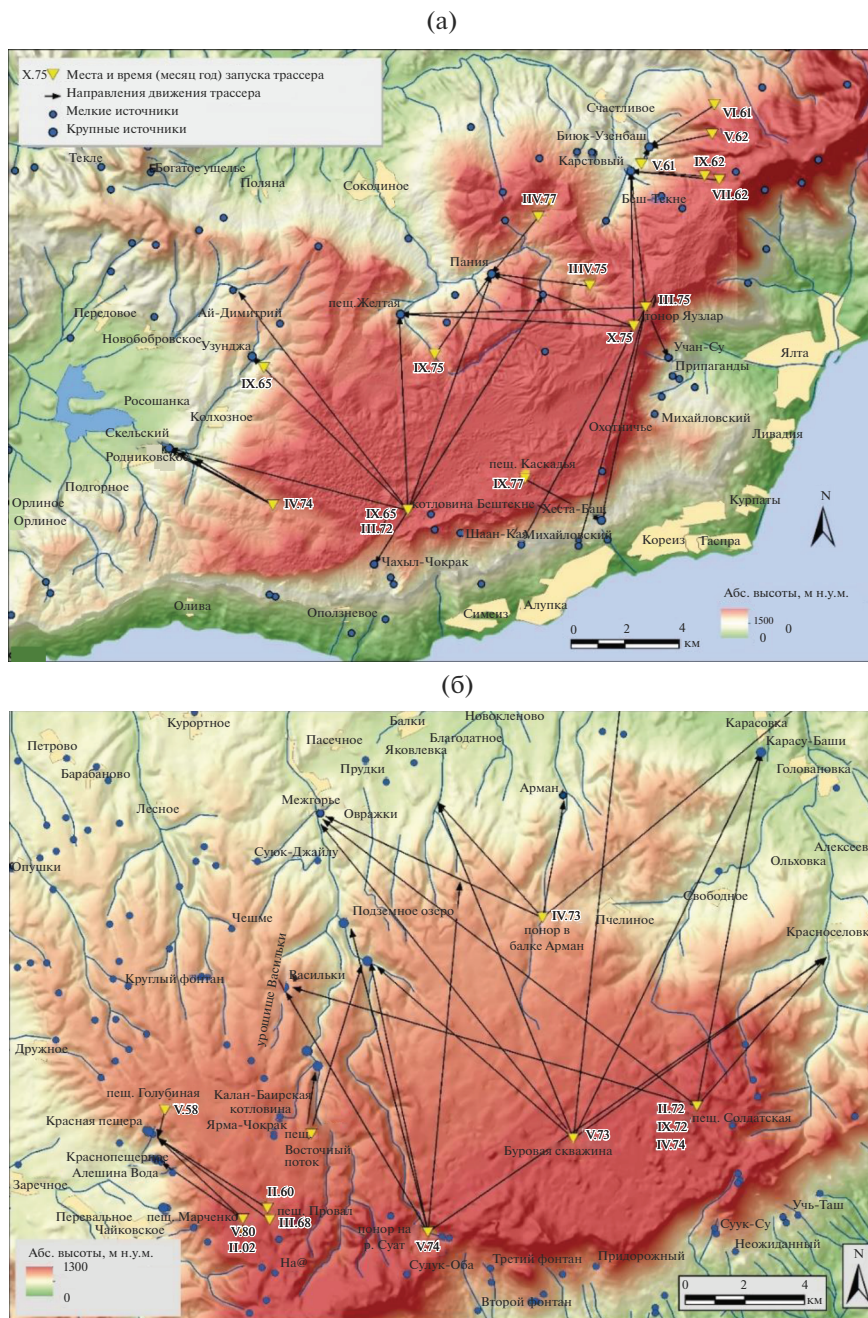


Рис. 3. Схемы индикаторных экспериментов на Ай-Петринском и Ялтинском массивах (а), на Долгоруковском и Карабийском массивах (б) (построены по данным [8, 9, 11, 28]).

ками в течение нескольких последующих лет, что делает проблематичным проведение последующих экспериментов с тем же красителем. Например, на Карабийском массиве в течение 1972–1974 гг. проводилось 6 экспериментов с одним и тем же красителем (рис. 3б). Похожая картина наблюдается на Ай-Петринском и Ялтинском массивах (рис. 3а). Результаты экспериментов, указывающие на центробежный характер растекания красителя внутри массивов, не соответствуют из-

вестным сведениям об изолированности карстовых водоносных систем и объясняются известным явлением “двойной пористости” в закарстованных породах [11]. Однако такое объяснение представляется недостаточно убедительным.

Таким образом, актуальные задачи – уточнение водосборной структуры карстовых массивов Горного Крыма и выяснение их гидродинамического режима в условиях различных уровней водности. Для этого необходима серия систематиче-

ских экспериментов по мультитрассированию карстовых водообменных систем с одновременным использованием нескольких красителей, обладающих различными спектральными характеристиками. Это существенно повысит информативность результатов и достоверность численных моделей бассейнов крымских рек карстового питания.

ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУБМАРИННОГО СТОКА

Среди видов водных ресурсов, связанных с карстом, в Крыму получили развитие практически неиспользуемые в хозяйстве воды субмаринного стока, разгружающиеся в прибрежной зоне шельфа Черного и Азовского морей. Для этого типа карстовых вод также характерна высокая степень канализованности стока и локализации разгрузки. Наличие зон сосредоточения выходов субмаринного стока на закарстованных участках побережья Крыма обосновано теоретическими разработками и доказано прямыми (гидрохимическими, спелеоподводными и др.) и дистанционными методами [11, 21, 25, 34, 35]. Отмечается большое разнообразие обстановок субмаринной разгрузки карстовых вод. Однако анализ локализации факелов пресных вод и их гидрогеологических условий свидетельствует о том, что среди видов разгрузки в Крыму преобладают напорная по тектоническим нарушениям и безнапорная через аллювий переуглубленных речных долин. Условия разгрузки определяют объемы и режим субмаринных источников, а следовательно – и возможность их каптирования.

Имеющиеся на сегодняшний день расчеты объемов субмаринной разгрузки имеют приблизительный оценочный характер, поскольку выполнены на основе объединения данных, полученных различными методами, и без учета отдельных прибрежных участков, где отсутствует или недостаточна гидрогеологическая информация. Тем не менее даже ориентировочные подсчеты показывают, что суммарный объем безвозвратно уходящих в море пресных вод с территории Крыма составляет $3.4 \text{ м}^3/\text{с}$, или $\sim 100 \text{ млн м}^3$ в год [34]. Только в районе м. Айя в межливневый период разгружается $>3000 \text{ м}^3/\text{сут}$. В сезон дождей этот показатель увеличивается в 8–9 раз. Годовой объем стока, перехваченный на этом участке, мог бы существенно улучшить ситуацию с водоснабжением Балаклавы и Севастополя. Следует отметить, что качество теряемых вод высокое, в большинстве случаев соответствующее ГОСТ “Вода питьевая”. Такие данные побуждают к дальнейшим более детальным исследованиям субмаринных систем стока с применением современных методик и новейшего аппаратного обеспечения. Сдерживающим фактором выступают гидрогео-

логические и гидротехнические условия, малоблагоприятные для создания сооружений по перехвату субмаринного стока на побережье или на шельфе. В одних случаях это – рассредоточенность разгрузки, большие глубины, активный волновой режим, в других – малые площади извлекательных массивов, формирующих субмаринный сток [10].

ПРОБЛЕМА ОХРАНЫ КАРСТОВЫХ ВОД

При переходе народного хозяйства Крыма на собственные, достаточно дефицитные ресурсы поверхностных и подземных вод важнейшей задачей становится оценка уязвимости карстовых вод к загрязнителям. В международной практике в качестве научной основы для проектирования зон санитарной охраны подземных водозаборов используется оценка и картирование уязвимости подземных вод к загрязнению [14, 32, 39].

За последние десятилетия в европейских странах осознана необходимость применения специальных подходов для оценки уязвимости подземных вод в условиях карста, что выразилось в разработке общей международной методологии и частных региональных методик оценки и картирования уязвимости карстовых вод [36]. Для условий Горного Крыма разработана региональная методика оценки уязвимости карстовых подземных вод к загрязнению [27, 30], которая апробирована на примере Ай-Петринского массива [26, 29]. Выявлено, что наиболее уязвимые зоны карстовых водосборов – участки с высокой концентрацией карстовых форм рельефа, тальвеги балок, замыкающиеся на поноры и разрывные нарушения, а также участки голого карста, лишённые почвенно-растительного покрова. К категориям “высокой” и “очень высокой уязвимости” относятся соответственно 18.6 и 7.1% площади Ай-Петринского массива (рис. 4).

Актуальная задача – оценка уязвимости карстовых вод на остальных массивах Горного Крыма, а также оценка уязвимости крупных выходов карстовых вод (полная уязвимость). Результаты последней должны стать основой для организации зон санитарной охраны карстовых водозаборов. Для выполнения оценки полной уязвимости карстовых вод необходима надежная информация о подземной структуре водосборов и о гидрологических условиях фреатической и эпифреатической зон карстовых массивов, для получения которой необходимо проведение систематических экспериментов по мультитрассированию.

ВЫВОДЫ

Растущее понимание природы, роли и закономерностей карста как геосистемы “растворимая порода – вода” имеет большое значение как для

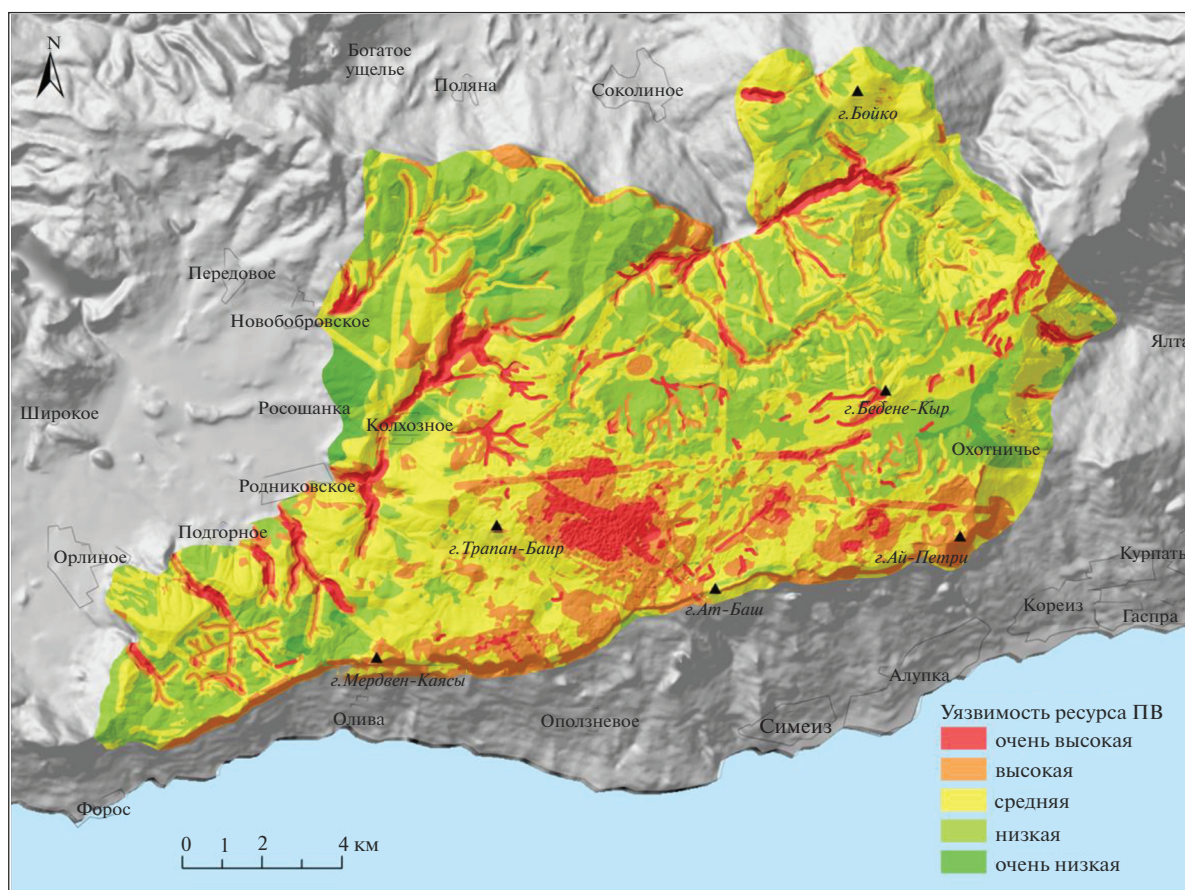


Рис. 4. Карта уязвимости ресурса подземных вод массива Ай-Петри, полученная с использованием Горно-Крымской методики [27].

теоретической гидрогеологии, так и для эффективного решения практических проблем закарстованных территорий Крыма, связанных с охраной и использованием водных ресурсов, поиском, разведкой и эксплуатацией карстогенных месторождений пресных, термальных и минеральных вод и др.

В сложившейся острой ситуации с водоснабжением Крымского региона можно выделить следующие наиболее проблематичные вопросы карстовой гидрогеологии полуострова, требующие решения в ближайшем будущем:

оценка запасов и ресурсов карстовых вод Горного Крыма, в том числе определение емкости фреатической и эпифреатической зон карстовых массивов;

оценка буферной функции эпикарстовой зоны на основе определения ее емкостных и фильтрационных параметров;

уточнение границ водосборных площадей наиболее крупных карстовых источников при разных уровнях водности;

определение доли подземного карстового стока, уходящей на питание артезианского бассейна равнинного Крыма;

оценка объемов субмаринного стока и возможностей его перехвата;

выполнение оценки полной уязвимости к загрязнениям для крупных карстовых водозаборов, необходимой для обоснования границ зон санитарной защиты;

разработка численных гидрогеологических моделей для отдельных карстовых водоносных систем и карстовых массивов.

Для решения этих вопросов предлагаются следующие направления исследовательских работ:

режимные гидрометеорологические наблюдения в области питания карстовых водоносных систем, гидрометрические и гидрохимические наблюдения в очагах их разгрузки, включающие в себя наблюдения изотопного состава атмосферных осадков и карстовых вод;

выполнение программы систематических экспериментов по мультитрассированию карстовых

вод в Горно-Крымской области на современном технологическом и методическом уровне;

спелеологические работы, направленные на выявление и документирование отдельных звеньев карстовых водоносных систем, определение их эволюционно-генетических особенностей.

Особенно следует отметить, что решающее значение для правильной интерпретации получаемой информации и последующей разработки математических моделей карстового стока имеет применение современных спелеогенетических концепций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Амеличев Г.Н.* Эволюция гипогенного карста в бассейне р.Зуя (Крым) // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2019. Т. 5. № 4. С. 241–254.
2. *Амеличев Г.Н., Стрэнато А.Д.* Закономерности развития и распространения карста в центральной части Крыма // VI Региональная науч.-практ. конф. Карст и пещеры Кавказа: результаты, проблемы и перспективы исследований. Сочи, 2021. С. 10–19.
3. *Вахрушев Б.А.* Районирование карста Крымского полуострова // Спелеология и Карстология. 2009. № 3. С. 39–45.
4. *Ведь И.П.* Климат и облесение крымских нагорий. Симферополь: ТНУ, 2007. 136 с.
5. Гидрогеология СССР. Т. VIII. Крым / Под ред. *В.Г. Ткачука*. М.: Недра, 1970. 364 с.
6. *Дублянская Г.Н., Дублянский В.Н.* Картографирование, районирование и инженерно-геологическая оценка закарстованных территорий. Новосибирск, 1992. 144 с.
7. *Дублянский Г.Н., Дублянский В.Н., Андрейчук В.Н. и др.* Распространение карстующихся пород и типов карста на территории бывшего СССР // Инженерная геология карста. Доклады международного симпозиума. Т. 2. Пермь, 1993. С. 89–95.
8. *Дублянский В.Н.* Карстовые пещеры и шахты Горного Крыма. Л.: Наука, 1977. 180 с.
9. *Дублянский В.Н., Вахрушев Б.А., Амеличев Г.Н., Шуттов Ю.И.* Красная пещера. Опыт комплексных карстологических исследований. М.: РУДН, 2002. 190 с.
10. *Дублянский В.Н., Дублянская Г.Н.* Карстовая республика (Карст Крыма и его проблемы). Симферополь, 1996. 88 с.
11. *Дублянский В.Н., Кикнадзе Т.З.* Гидрогеология карста альпийской складчатой области юга СССР. М.: Наука, 1984. 128 с.
12. *Дублянский В.Н., Клименко В.И., Вахрушев Б.А., Илюхин В.В.* Карст и подземные воды горных массивов Западного Кавказа. Л.: Наука, 1985. 150 с.
13. *Дублянский В.Н., Лялько В.И., Подорван В.Н.* Подземный сток в акватории Черного моря // Геология шельфа УССР. Твердые полезные ископаемые. Киев: Наук. думка, 1983. С. 126–153.
14. *Зекцер И.С., Каримова О.А., Бужуоли Ж., Буччи М.* Региональная оценка уязвимости пресных подземных вод: методологические аспекты и практическое применение // Вод. ресурсы. 2004. Т. 31. № 6. С. 645–650.
15. *Климчук А.Б.* Роль приповерхностной зоны карстовых массивов в гидрогеологии и морфогенезе карста. Киев: ИГН, 1989. 44 с.
16. *Климчук А.Б.* Гипогенный спелеогенез и его значение в карстологии и практических приложениях // Крымские карстовые чтения: состояние и проблемы карстолого-спелеологических исследований. Симферополь, 2008. С. 8–11.
17. *Климчук А.Б.* Гипогенный спелеогенез, его гидрогеологическое значение и роль в эволюции карста. Симферополь: DIP, 2013. 180 с.
18. *Климчук А.Б.* Основные особенности и проблемы гидрогеологии карста: спелеогенетический подход // Спелеология и карстология. 2008. № 1. С. 23–46.
19. *Климчук А.Б.* Эпикарст: гидрогеология, морфогенез и эволюция. Симферополь: Сонат, 2009. 112 с.
20. *Климчук А.Б., Амеличев Г.Н., Науменко В.Г., Токарев С.В.* Оценка мощности эпикарстовой зоны по распределению глубин воронок // Спелеология и карстология. 2009. № 3. С. 26–38.
21. *Климчук А.Б., Амеличев Г.Н., Самохин Г.В.* Особенности разгрузки пресных вод на мысе Айя (Крым) // Крымские карстовые чтения: Состояние и проблемы карстолого-спелеологических исследований. Симферополь, 2008. С. 44–47.
22. *Климчук А.Б., Тимохина Е.И., Амеличев Г.Н., Дублянский Ю.В., Шпетль К.* Гипогенный карст Предгорного Крыма и его геоморфологическая роль. Симферополь: DIP, 2013. 214 с.
23. *Климчук А.Б., Токарев С.В.* Рекомендации по охране подземных источников питьевого водоснабжения в карстовых регионах // Спелеология и карстология. 2014. № 12. С. 5–16.
24. *Лущик А.В., Морозов В.И., Мелешин В.П., Иванов Б.Н., Коджаспиров А.А., Белокопытова Н.А., Капинос Н.Н., Парамонова Н.К., Кондрашов В.М., Улитина А.А.* Подземные воды карстовых платформенных областей Украины. Киев: Наук. думка, 1981. 200 с.
25. *Пасынков А.А., Пасынкова Л.А.* Карстово-трещинные обводненные зоны Горного Крыма и источники субмаринной разгрузки // Спелеология и карстология. 2014. № 13. С. 60–68.
26. *Токарев С.В.* Оценка уязвимости карстовых подземных вод к загрязнению на примере массива Ай-Петри // Вопросы географии. Сб. 147. Спелеология и карстоведение. 2018. С. 143–160.
27. *Токарев С.В.* Уязвимость карстовых подземных вод Горного Крыма к загрязнению: выявление, оценка и картирование. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Симферополь: КФУ, 2020. 26 с.
28. *Токарев С.В., Амеличев Г.Н., Вахрушев Б.А., Самохин Г.В., Науменко В.Г., Брага Е.В.* Движение карстовых вод в условиях низкой водности: результаты новейшего индикаторного эксперимента в Горном Крыму // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению. Сб. докл. международ. науч.конф. СПб.: СПбГУ, 2020. С. 202–207.

29. *Токарев С.В., Климчук А.Б.* Оценка и картирование уязвимости карстовых подземных вод в Горном Крыму (на примере массива Ай-Петри) // Экологическая безопасность и строительство в карстовых районах. Материалы Международ. симпоз. Пермь, 2015. С. 337–341.
30. *Токарев С.В., Климчук А.Б.* Развитие Горно-Крымского подхода к оценке уязвимости подземных вод карстовых районов // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Т. 10. Вып. 1. С. 898–909.
31. *Шестопалов В.М., Блинов П.В., Лютый Г.Г., Санина И.В., Руденко Ю.Ф.* Современные принципы гидрогеологического районирования // Сб. науч. тр. УкрГГРИ. 2010. Вып. 3–4. С. 147–157 (на украинском языке).
32. *Шестопалов В.М., Богуславский А.С., Бублясь В.Н.* Оценка защищенности и уязвимости подземных вод с учетом зон быстрой миграции. Киев, 2007. 120 с.
33. *Шестопалов В.М., Лялько В.И., Огнянник Н.С. и др.* Водообмен в гидрогеологических структурах Украины: Водообмен в естественных условиях. Киев: Наук. думка, 1989. 288 с.
34. *Юровский Ю.Г.* Особенности природных процессов в зонах субмаринной разгрузки подземных вод. Автореф. дис. ... докт. геол.-минерал. наук. Киев: ИГН, 1993. 44 с.
35. *Юровский Ю.Г.* Подземные воды шельфа. Задачи и методы изучения. Симферополь, 2013. 260 с.
36. COST Action 620. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. Final report COST Action 620 / Ed. *Zwahlen F.* Brussels: European Commission, Directorate, 2004. 315 p.
37. *Dublyansky Yu.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 // *J. Hydrol.* 2018. V. 565. P. 61–73.
38. *Dublyansky Yu.V., Klimchouk A.B., Tokarev S.V., Amelichev G.N., Spötl C.* Groundwater of the Crimean Peninsula: A first systematic study using stable isotopes // *Isotopes Environ. Health Studies.* 2019. V. 55. Iss. 5. P. 419–437.
39. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability / Eds *J. Vrba, A. Zaporozec:* International Contributions to Hydrogeology, Int. Association Hydrogeol. Heise, Hanover, 1994. V. 16. 131 p.
40. *Klimchouk A.B.* Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and Morphogenetic Perspective. Carlsbad: National Cave and Karst Res. Inst., 2007. Special Paper 1. 106 p.
41. *Klimchouk A.B., Ford D.C.* Types of karst and evolution of hydrogeologic settings / Eds *A. Klimchouk, D. Ford, A. Palmer, W. Dreybrodt* // *Speleogenesis: Evolution of karst aquifers.* Huntsville: Natl. Speleol. Soc., 2000. P. 45–53.
42. *Klimchouk A.B., Ford D.C., Palmer A.N., Dreybrodt W.* *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers.* Huntsville, 2000. 527 p.
43. *Worthington S., Ford D., Beddows P.* Porosity and permeability enhancement in unconfined carbonate aquifers as a result of solution / Eds *A. Klimchouk, D. Ford, A. Palmer, W. Dreybrodt* // *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers.* Huntsville: Natl. Speleol. Soc., 2000. P. 423–432.