

В.М.Шестопалов*, А.С.Богуславский**,
А.Б.Климчук***, А.В.Фесенко****, Г.Е.Годенко****

**Институт геологических наук НАН Украины, г.Киев*

***Московский государственный университет, г.Москва*

****Украинский институт сейсмологии и карстологии
Таврического университета, г.Симферополь*

*****Одесский национальный университет, г.Одесса*

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГОРНОГО КРЫМА

Разработана схематизация гидрогеологических условий и создана предварительная гидрогеологическая модель юго-западной части Горного Крыма для оценки динамики и ресурсов подземных вод. Показано соответствие схематизации модели природным условиям. Выполнен модельный анализ основных направлений движения подземных вод из областей питания (карстовых массивов) яйл в предгорные районы и зоны субмариной разгрузки. Результатом работы является создание предварительной гидрогеологической модели юго-западной части Горного Крыма как основы для дальнейшей ее разработки с целью создания постоянно-действующей математической модели.

Исследование формирования ресурсов подземных вод Горного Крыма необходимо как с точки зрения перспектив улучшения водоснабжения региона, так и с точки зрения развития его рекреационной инфраструктуры в предгорных районах и прибрежной зоне, поскольку поток и разгрузка подземных вод связаны с инженерно-геологическими опасностями и рисками территории.

Подземные воды карстового формирования горных массивов юго-западного Крыма являются компонентой геологической среды весьма уязвимой к влиянию современных техногенных факторов, которые нарушают природные гидрогеологические и геоэкологические условия территории. К этим факторам следует отнести: загрязнение атмосферы, приводящее к химически агрессивным осадкам, необоснованные водоотборы, масштабное строительство с террасированием склонов, уничтожение лесов в результате вырубок и пожаров, отбор грунтов (песка, гальки) в пределах береговой зоны и др.

Все это может привести к сравнительно быстрому ухудшению геоэкологической обстановки региона и условий формирования подземных вод как с точки зрения их ресурсов, так и качества, если своевременно не принимать меры к их изучению, охране и рациональному использованию.

Настоящая работа выполнена в результате анализа уточненных геологических, структурно-геоморфологических, гидрогеологических электронных картографических основ территории южного, юго-западного берега Горного Крыма и прилегающих горных массивов.

Целью работы является схематизация гидрогеологических условий для

© В.М.Шестопалов, А.С.Богуславский, А.Б.Климчук, А.В.Фесенко,
Г.Е.Годенко, 2008

создания гидрогеологической модели подземных вод юго-западной части Горного Крыма, которая может быть использована для анализа состояния их естественных ресурсов, защищенности, а также оценки прогнозных эксплуатационных ресурсов для целей водоснабжения.

Геолого-гидрогеологические условия юго-западной части Горного Крыма. Территорией исследований настоящей работы является юго-западная часть Горного Крыма от г.Балаклава до г.Алушта и его северных склонов до п.Куйбышево (Бахчисарайский р-н), а также прилегающая к ней с юга территория Южного берега Крыма. Общая площадь исследуемой территории составляет 1500 км².

Геологические условия. Тектоническая схема синклиория юго-западного Крыма с его наиболее прогнутой частью (а) и Сухореченской антиклиналью (б) по Г.А.Лычагину [1] показана на рис.1.

Основной структурно-геологической особенностью района является наличие двух структурных этажей: доверхнеюрского и верхнеюрского (рис.2).

Комплексная карта-схема геологического строения, составленная по [2 – 4] представлена на рис.3.

Нижний (доверхнеюрский) этаж представляет собой сложную складчато-блоковую систему структур, сложенных песчано-глинистым комплексом средней юры и таврической серии, которая совместно со среднеюрскими отложениями образуют цоколь Главной гряды Крымских гор, в гидрогеологическом аспекте – цокольный водоупор. Обнажаются породы таврической серии как в пределах северных склонов главной гряды (Качинское антиклинальное поднятие), так и в пределах южных склонов (южнобережное поднятие). Породы серии представлены аргиллитами, алевролитами и песчаниками аспидной формации. Тонкое ритмичное переслаивание указанных пород является причиной того, что их обычно относят к флишу. Мощность отложений таврической серии оценивается как превышающая 2300 м (по скважине, пробуренной в районе с.Ущельное (Ялта)). Среднеюрская толща представлена песчано-глинистыми отложениями и выходит на дневную поверхность как в пределах южных, так и северных склонов главной гряды Крымских гор.

Верхний структурный этаж представлен толщей верхнеюрских известняков с характерным блоковым строением. Суммарная мощность карбонатных пород верхней юры в районе Ялтинской яйлы превышает 2000 м [5].

Гидрогеологические условия исследуемой территории являются весьма сложными и до настоящего времени недостаточно исследованными. Это подтверждается отсутствием достоверных данных о пространственном распределении пьезометрической поверхности подземных вод в пределах территории карстовых массивов, сильно изменчивыми и в достаточной мере не изученными направлениями и скоростями движения подземных вод, вследствие сильно расчлененного рельефа водосборов, наличия карстовых и трещинно-карстовых зон движения подземных вод в известняках до глубин ниже



Р и с . 1 . Тектоническая схема исследуемой территории по Г.А.Лычагину [1].

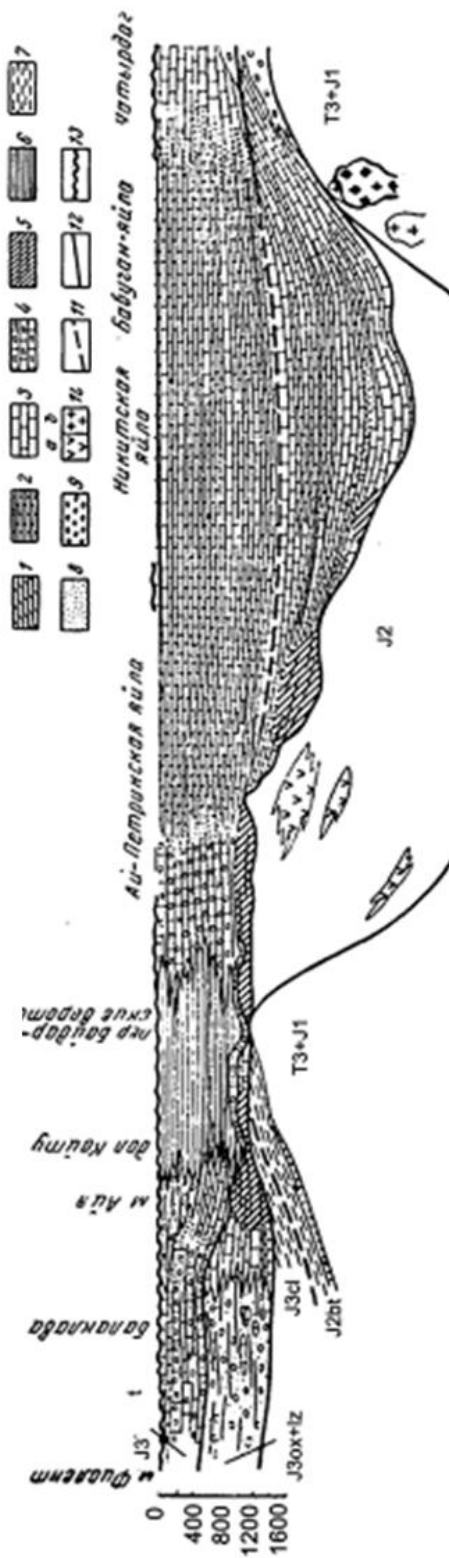
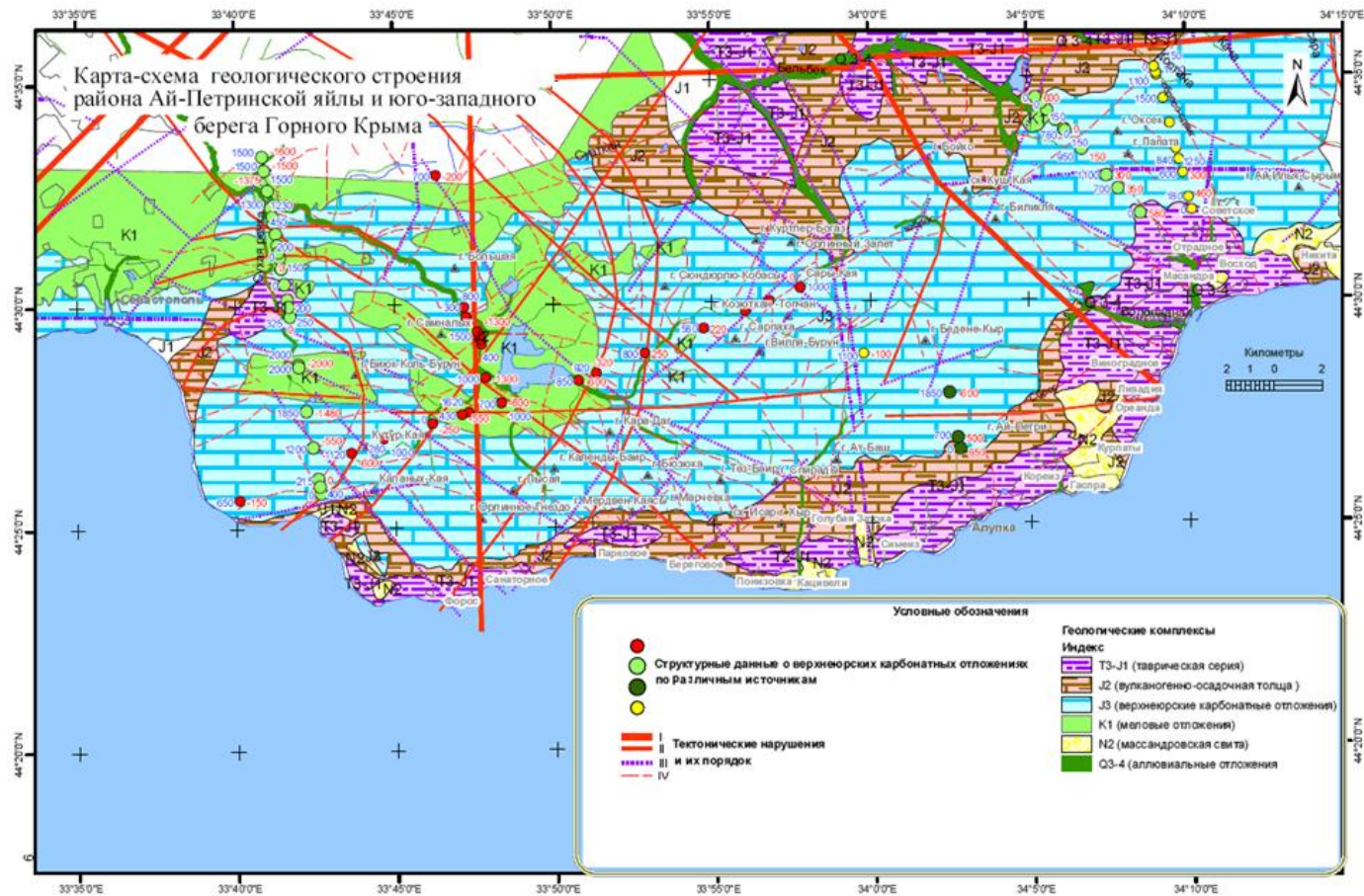


Рис. 2. Продольный стратиграфо-фациальный разрез верхнеюрских отложений Горного Крыма по [1].
 Условные обозначения: 1 – мергели; 2 – тонкостойстые глинистые известняки; 3 – слоистые известняки; 4 – брекчиевидные известняки; 5 – рифогенные известняки; 6 – флиш; 7 – глины; 8 – песчаники; 9 – конгломераты; 10 – эффузивы (а), интрузии (б); 11 – граница согласного залегания; 12 – граница несогласного залегания; 13 – граница глубокого размытия.

уровня моря, многочисленных тектонических разломных нарушений, значительной изменчивости и зависимости процессов питания подземных вод от климатических факторов. Все эти причины не позволили к настоящему времени в должной степени оценить ресурсы подземных вод горного Крыма, несмотря на множество оценочных и поисково-разведочных работ, проведенных различными организациями.

С гидрогеологической точки зрения, основной особенностью исследуемого района является наличие карстовых водосборов – плато и склонов главной гряды Крымских гор. Значительную часть водосборных плато ("яйл") исследуемой территории (с запада на восток: Ай-Петринская, Ялтинская, Никитская, Бабуган яйлы) занимают замкнутые карстовые водосборы (воронки), концентрирующие осадки (особенно, в виде снега в зимний период) и поверхностный сток (в теплое время года), и уводящие влагу внутрь известнякового массива (рис.4). Площадь этих плато в пределах исследуемой территории составляет около 250 км². Наибольшую территорию занимает Ай-Петринский массив, который играет главную роль в формировании питания подземных вод района.



Р и с . 3 . Карта геологического строения исследуемой территории (по [2 – 4]).

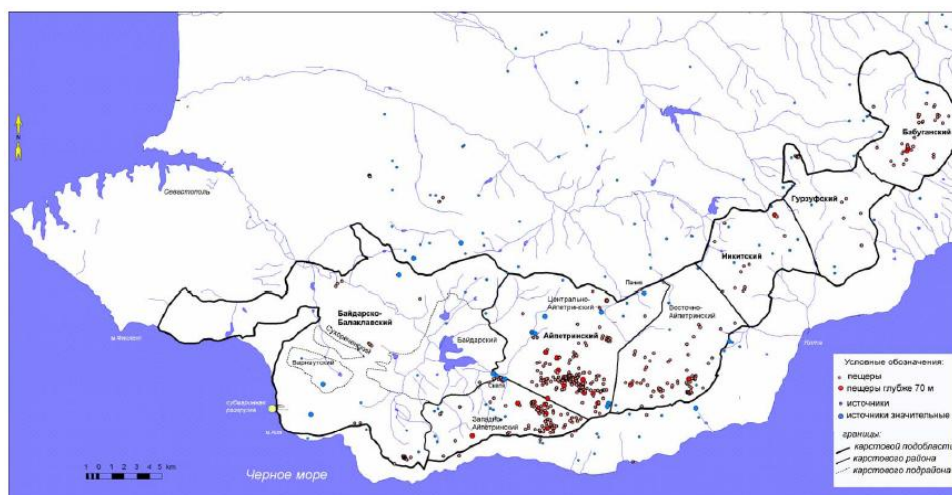


Р и с . 4 . Типовая карстовая воронка в центральной части Ай-Петринской яйлы.
Фото Фесенко А.В. (2007 г.).

Обзорная схема карстологического районирования, составленная по материалам создаваемой в НИЦ "Украинский Институт спелеологии и карстологии" Министерства образования и науки Украины и НАН Украины (УИСК) геоинформационной системы "Карст Крыма" показана на рис.5.

Основным исходным параметром для определения питания подземных вод является среднегодовая норма осадков, которая в пределах яйл юго-западной части Горного Крыма оценивается величиной 1050 – 1100 мм. При этом среднегодовая оценка испарения составляет 450 – 500 мм/год, т.е. около 46 % от осадков [6, 7].

Для горных карстовых массивов общеприняты представления о том, что формирование карстовых подземных вод связывается с тремя видами питания: *инфильтрационным* (рассеянное проникновение в почву и корен-



Р и с . 5 . Обзорная схема карстологического районирования юго-западного синклинария Горного Крыма.

ные породы атмосферной воды и склонового стока), *инфлюационным* (проникновение в породы сосредоточенного стока) и *конденсационным*. Их значение в районах с развитием голого, задернованного (открытого) и закрытого карста существенно отличается.

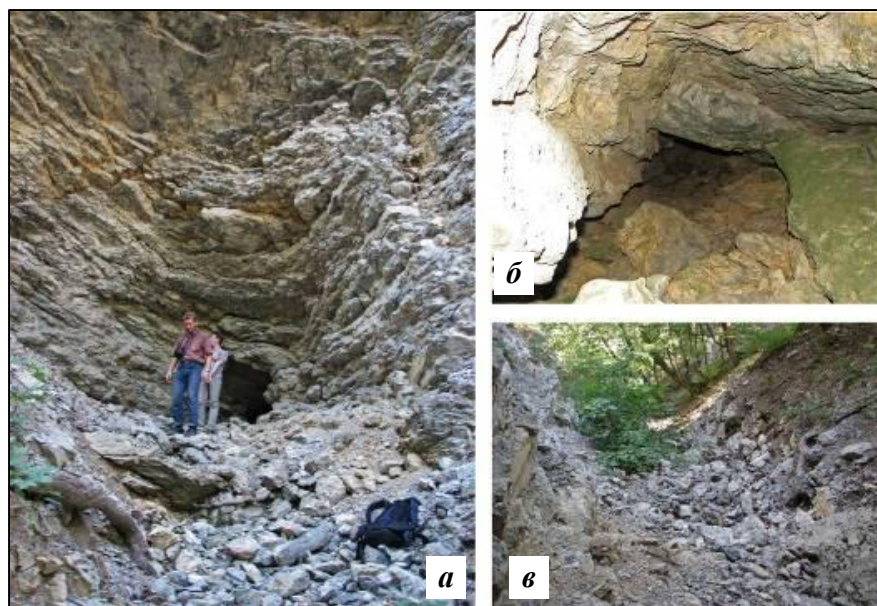
Комплексные исследования, выполненные в связи с расчетом водного баланса юго-западной части Горного Крыма, показали, что 85 % территории массива занято задернованным карстом. На долю голого карста приходится всего 15 % его площади, 70 % площади балансового бассейна покрыто лесом [8].

Инфильтрационное питание имеет наибольшее значение на участках развития голого карста. Здесь атмосферные осадки питают карстовые воды на протяжении всего года, и потери на испарение не превышают 20% нормы осадков. На участках развития задернованного карста существенное влияние на величину питания оказывает почвенный покров. На Ай-Петринском массиве развиты среднemosные глинисто-щебенчатые луговые и черноземные почвы (на открытых участках) и бурые горно-лесные почвы (под буковыми и дубовыми лесами). На участках с почвенным слоем толщиной более 50 см осадки теплого периода практически полностью расходуются на испарение и не участвуют в питании подземных вод. По данным почвенных съемок, такие условия существуют на 44 % площади Ай-Петринского балансового бассейна [8]. Более сложен расчет инфильтрационного питания для участков массива, покрытых лесом. За счет выпадения горизонтальных осадков (гололед, изморозь, 48 наморозь, роса), не учитываемых метеостанциями, лес получает дополнительно 250 мм влаги (25 % годовой суммы осадков). С этих участков не происходит зимой выдувания снега. Поэтому, несмотря на значительные потери на транспирацию, уголья, занятые лесом, питают карстовые воды на протяжении всего года. Величина питания составляет 55 – 65 % нормы осадков [8].

В отличие от площадной, очаговая инфильтрация, связанная с ветровым перераспределением снега, локализуется в понижениях рельефа – воронках, тальвегах временных водотоков, под структурными уступами. Такие же условия создаются в днищах открытых колодцев и шахт.

Инфлюационное питание широко представлено в пределах Ай-Петринского и Байдарско-Балаклавского районов. Периодическая инфлюация возможна на многих участках при ливнях и бурном снеготаянии. Временный поверхностный сток в линейных понижениях рельефа наблюдается на расстояниях от десятков до сотен метров и поглощается крупными понорами, зонами трещинного поглощения, пещерами-, и шахтами-понорами. Постоянное инфлюационное питание наблюдается на сравнительно небольших участках плато и склонов, сложенных некарстующимися или слабокарстующимися породами (западный и центральный Ай-Петринский районы Деймен-Дере, Бештекне). Эти водотоки имеют постоянный сток с расходами, варьирующими от сотых долей литра до 0,8 – 1,5 м³/с.

В теплое время года значительное влияние на формирование карстовых вод может оказывать *конденсация* в трещинно-каналовых коллекторах. Результаты исследований проведенные двумя независимыми (гидрометрическим и балансовым) методами показали, что модуль конденсационного стока в расчете на год может составлять 1,77 л/с км².

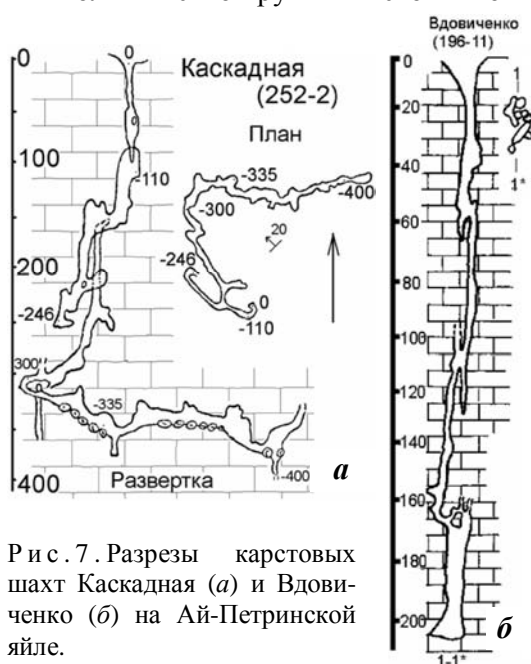


Р и с . 6. Карстово-гравитационное русло временного потока подземных вод в верховье р.Водопадной на высоте более 70 – 80 м выше уреза воды в русле: общий вид устья подземной части (а); подземное русло (б); выработанное русло временного потока (в). Фото Фесенко А.В., Годенко Г.Е. (сентябрь 2008 г.).

Инфильтрационное питание в пределах Ай-Петринского массива имеет наибольшее значение на участках развития голого карста [8].

Разгрузка подземных вод осуществляется на склонах массивов (рис.6).

Большинство крупных источников и групп источников расположено



Р и с . 7. Разрезы карстовых шахт Каскадная (а) и Вдовиченко (б) на Ай-Петринской яйле.

в нижней и средней частях склонов. Они обнаруживают четкую приуроченность к зонам крупных дезъюнктивных нарушений верхнеюрских известняков. Существование малодебитных источников в верхах склонов объясняется наличием мелких внутриформационных водоупоров (пачек глинистых известняков, алевролитов, и глинистых конгломератов).

Сток трещинно-карстовых вод в пределах яйлы происходит по трещинно-карстовым зонам. Наиболее обводненные зоны локализируются вдоль крупных тектонических нарушений. Разбитая на блоки карбонатная толща подстилается аргиллит-пес-



Рис. 8. Типичные карстовые формы Ай-Петринского массива. Фото Фесенко А.В., Годенко Г.Е. (сентябрь 2008 г.).

направлениями потока подземных вод, полученными в результате двух проведенных трассерных экспериментов с запуском красителя в обводненные карстовые полости в восточной и западной частях Ай-Петринской яйлы [13]. Как видно на рисунке, карстовые воды из восточной части Ай-Петри движутся на значительные расстояния, достигая мест разгрузки на юго-западе – в Байдарской долине и на побережье вблизи Фороса. Указанные

чаниковым водоупорным слоем.

О значительной глубинности карстования можно судить по глубине разведанных карстовых полостей, достигающих 400 м и более [9, 10] (рис.7), значительная часть которых находится на Ай-Петринской яйле (рис.8).

Согласно палеорекострукциям уровень Черного моря в течение последнего миллиона лет неоднократно опускался минимум на 100 – 200 м по сравнению с существующим (рис.9) [11]. В результате существенно опускались базисы дренирования подземных вод Крымских гор, и соответственно активизировалось карстообразование в глубоких частях юрского карбонатного массива. Можно с достаточной степенью уверенности предположить, что этот массив пронизан карстовой системой на глубину более 1000 м, как минимум, до глубин не менее 200 м ниже современного уровня моря. А в местах уменьшения мощности карбонатных пород карстовая проработка охватывает всю их мощность.

В пользу этой гипотезы говорят также данные о расположении подводных каньонов шельфа у берегов Крыма, которые являются палеоруслуями рек, часто продолжающими существующие реки (рис.10) [12]. Наличие этих русел до глубин 2000 м и более свидетельствует о существовании в прошлом и более глубоких базисов дренирования.

О распределении стока, формирующегося в пределах Ай-Петринского массива, можно судить по результатам экспериментов по трассированию подземных вод [13 – 15] и воднобалансовым исследованиям [8, 16]. Частичная разгрузка в виде источников происходит на севере (северный контур разгрузки) и на юге (южный контур).

На рис.11 показан фрагмент карты исследуемой территории с результирующими



Рис. 9. Новозавксинский бассейн до и после затопления в результате прорыва Средиземноморских вод (по [11]).

направления были использованы для калибровки разрабатываемой математической модели потока подземных вод. Существенный сток направлен к западному (Байдарскому) контуру. Тут на границе распространения слабопроницаемого нижнемелового покрова

происходит частичная разгрузка в виде источников Байдарской котловины. На этом контуре воды, поступающие из разных питающих подсистем Ай-Петринского массива, приобретают напор, что отражается в сложной гидродинамике Родниковско-Чернореченского гидрогеологического узла. Его положение и своеобразие определяется пересечением нескольких гидрогеологически активных тектонических нарушений. Согласно балансовой оценке величина инфильтрации в глубокие водоносные горизонты Байдарской котловины со стороны массива Ай-Петри составляет 162,7 тыс. м³/сут [8].

Преобладающее количество источников имеют расходы в межень менее 1 л/с (около 80%), увеличивая свои дебиты в паводок в десятки раз. Около 15 % источников, имеют расходы в межень 1 – 10 л/с и около 5 % превышают 10 л/с (рис.12) [17, 18].

Источники характеризуются крайне неравномерными режимами с резко выраженной сезонностью [19].

Транспорт и разгрузка подземных вод в пределах южных склонов происходит в основном по относительно проницаемым четвертичным отложениям и зонам выветривания аргиллито-песчаниковых пород, залегающим на толще слабопроницаемых отложений таврической серии (алевроиты, аргиллиты и песчаники) и песчано-глинистых отложений средней юры. Формирование подземных вод в четвертичных отложениях,

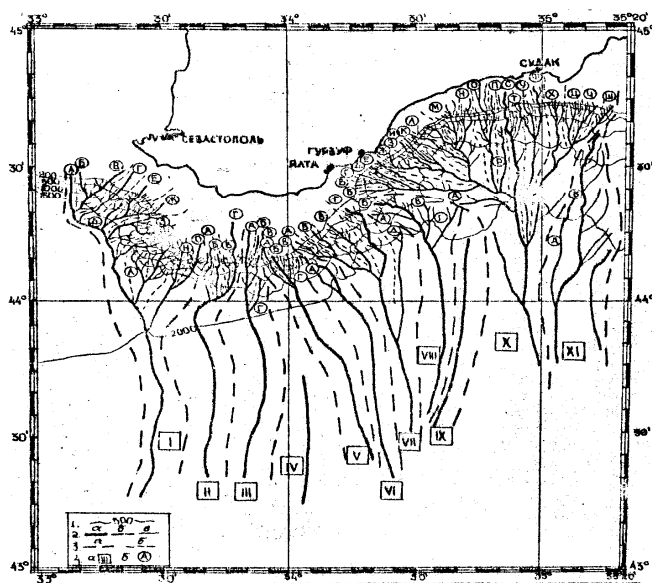


Рис. 10. Схема подводных каньонов материкового склона Южного берега Крыма по В.И. Мельнику [12].

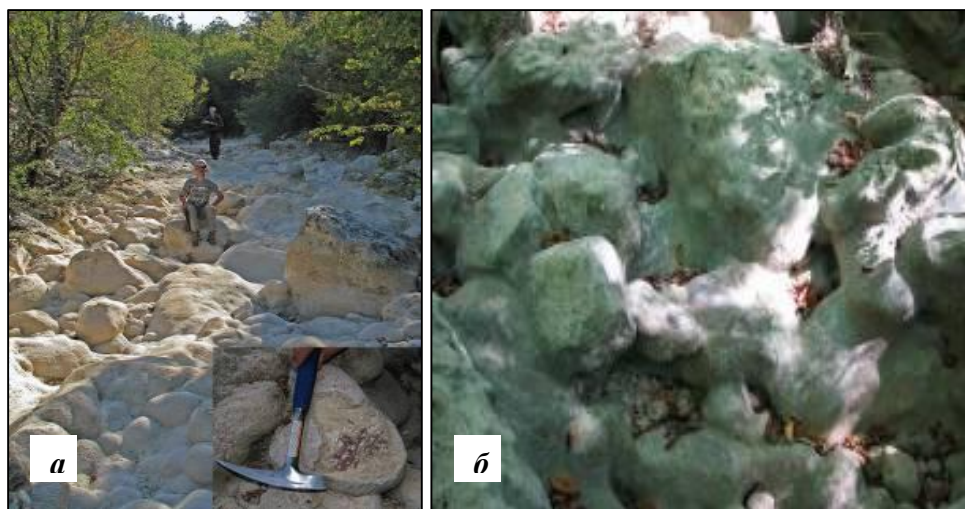


Р и с . 1 2 . Карстовые родники и участки разгрузки карстово-трещинных подземных вод: карстовые родники в верховье ущелья Уч-Кош (а, б); разгрузка карстово-трещинных вод в русло р.Черной (истоки реки) (в); разгрузка карстово-трещинных вод в русло р.Коккозки (верховье) (г). Фото Фесенко А.В., Годенко Г.Е. (сентябрь 2008 г.).

происходит в основном за счет трещинно-карстовых вод из массивов яйл. Подземные воды движутся по направлению от яйл к морю. По пути часть вод выходит на дневную поверхность в виде родников с дебитами до 8 – 10 л/с.

Также следует отметить, что полевым геолого-гидрогеологическим обследованием русел крупных рек в районе Ай-Петринской яйлы нами отмечено значительное распространения в верховья рек и горных потоков процессов цементации русловых отложений известковым туфом на высоту в 1,5 – 2 м от дна рек (рис.13) что фактически останавливает, как процессы инфильтрации поверхностных вод, так и возможную разгрузку подземных вод в русловой аллювий рек. Толщина слоя известкового туфа может достигать 10 см.

Субмаринная разгрузка в прибрежной зоне района исследований происходит в виде прибрежных субмаринных источников, перетекания трещинно-карстовых вод, рассредоточенной разгрузки подземных вод оползневых и склоновых отложений, разгрузки аллювиальных вод в конусах выноса рек, а также разгрузки артезианских вод глубоких водоносных горизонтов по зонам



Р и с . 1 3 . Цементация русловых отложений: верховье р.Черная (у с.Колхозное) (а); район верховья р.Коккозка (4 км юго-западнее Большого Каньона) (б). Фото Фесенко А.В., Годенко Г.Е. (сентябрь 2008 г.).

тектонических нарушений в более глубоких склоновых частях морского дна.

Высокодебитные субмаринные источники со значительными ареалами распространения выявлены в районе мыса Айя, где карстующиеся известняки верхнеюрского возраста погружаются ниже уровня моря.

Исследования, проведенные в юго-западной части Крыма, свидетельствуют о значительных потенциальных возможностях субмариной разгрузки на Севастопольско-Балаклавском и Балаклавско-Форосском участках (рис.14) [20].

Заслуживают внимания результаты воднобалансовых работ в юго-западном Крыму [8], в ходе которых была выявлена доля субмаринного стока, оцениваемая только в районе Балаклавы около $14000 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Что касается участка побережья от пгт.Форос до г.Алушты, то возможные зоны разгрузки приурочены здесь к оползневым массивам, трещинным зонам на границе выхода вулканогенных массивов (Кастропольская вулканическая группа, массив Пиляки-Хыр севернее Голубого залива, г.Кастель, Аю-Даг). Разгрузка аллювиальных вод в конусах выноса рек южного и юго-западного побережья Крыма, в виде активных выходов проявляется в прибрежной полосе в виде очагов опреснения придонных морских и иловых вод. В периоды прекращения поверхностного и аллювиального стока (июль – ноябрь), очаги опреснения резко уменьшаются, либо исчезают. Расход в



Р и с . 1 4 . Существующие и предполагаемые зоны субмариной разгрузки Южного берега Крыма (показаны красным) [14, 15, 20].

очагах активной разгрузки аллювиальных вод, может составлять несколько сотен м³/сут. Участки опреснения придонных морских вод фиксировались и в каньонах на больших глубинах и в удалении от берега.

Гидрогеологическая модель юго-западной части Горного Крыма.

Концептуальная модель. Описанные выше геолого-гидрогеологические особенности территории явились основой разработки концептуальной гидрогеологической модели исследуемой территории юго-западной части Горного Крыма.

Как уже отмечалось выше, основной гидрогеологической особенностью исследуемой территории является наличие карстовых известняковых плато, сформированных верхне-юрскими известняками большой мощности (500 м и более) и площадью в пределах рассматриваемого участка до 250 км². Большую часть этого плато составляют яйлы Ай-Петринского массива. Эта территория является мощным аккумулятором вод атмосферных осадков и основной зоной формирования и питания подземных вод района [21].

Общая концептуальная модель питания карстовых подземных вод хорошо иллюстрируется схемой, предложенной в 1986 г. Дж.Ганном [22], рис.15. Согласно этой схеме, в верхней части ненасыщенной зоны карстового массива имеет место концентрация инфильтрационного потока в результате наличия вертикальных нисходящих путей (каналов) быстрой фильтрации, в которые попадает распределенная инфильтрация из почвы и слоя эпикарста, а также концентрированный поверхностный сток (инфлюация).

Ниже зоны аэрации, мощность которой может достигать сотен метров, происходит смена общего направления потока на преимущественно субгоризонтальное и формируется зона насыщения карстовых вод, которая отличается от насыщенной зоны гранулярных коллекторов прерывистостью обводнения, связанной с блочным строением известняковой толщи карстовых массивов, сложной геометрией карстовых полостей, трещин и т.п.

По вертикали схема включает следующие гидродинамические зоны:

1) *Эпикарстовая зона*, характеризуемая относительно равномерной и высокой проницаемостью и значительными емкостными свойствами. Она получает главным образом инфильтрационное питание, имеет изменчивую мощность в пределах от первых метров до десятков метров и содержит безнапорные воды, обычно образующие подвешенный водоносный горизонт (верховодка), дренируемый в нижележащую зону аэрации крупными трещинами и нарушениями.

2) *Зона аэрации* на различных участках массива имеет мощность до 400 м и более. В ней происходит смешивание инфильтрационных, инфлюационных и конденсационных вод. Инфлюационное питание минует эпикарстовую зону и быстро попадает в зону аэрации. Движение вод этой зоны преимущественно вертикальное и субвертикальное нисходящее, в крупных трещинах и каналах отличается высокой скоростью (0,4 – 0,5 м/с). Здесь располагаются все коррозионно-разрывные, нивально-коррозионные и большая часть коррозионно-эрозионных полостей, относящихся к верхнему звену карстово-водоносных систем.

3) *Зона сезонных колебаний уровней* имеет мощность до 50 м и более. Питание вод этой зоны осуществляется за счет зоны аэрации, а частичная

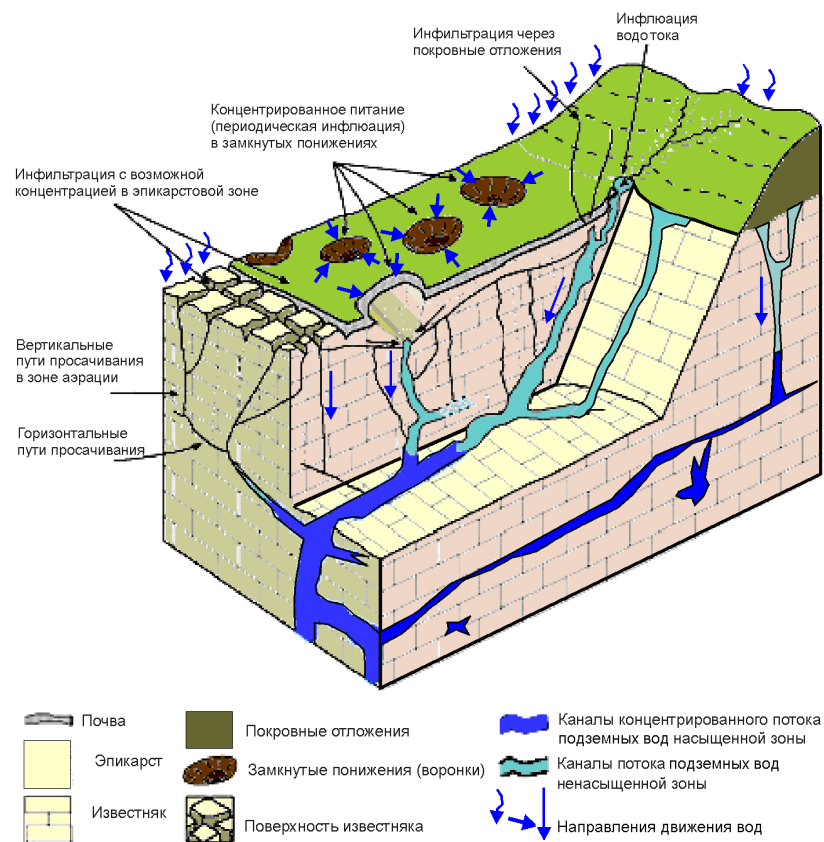


Рис. 15. Концептуальная схема питания карстовых подземных вод Дж.Ганна [22] с нашими добавлениями.

или полная их разгрузка происходит в источниках у подножия склонов, где располагаются пещеры-источники (Скельская, Узунджа, Желтая, Пания и др.) (рис.12).

4) *Зона полного насыщения.*

Зону полного насыщения в карстовых районах в целом можно характеризовать как безнапорную со свободной поверхностью, где локальный напор возникает в карстовых каналах, а также в нижней части зоны, где есть слои контрастной проницаемости. Для зоны полного насыщения (вместе со смежной с ней зоной сезонных колебаний уровней) характерна сложная гидродинамика, обусловленная взаимодействием различных фильтрационных сред (каналовой и порово-трещинной)

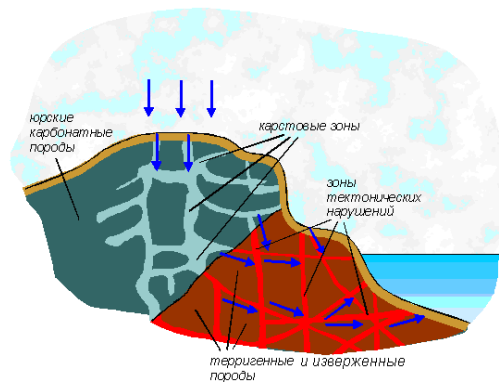


Рис. 16. Концептуальная гидрогеологическая схема питания и разгрузки карстовых подземных вод в системе «суша-море» основной части юго-западного синклинория Горного Крыма.

в условиях переменного питания различных видов.

Концептуальная схема питания и разгрузки подземных вод карстового массива в системе «суша-море» показана на рис.16.

Несмотря на столь сложную гидродинамику карстовых сред, моделирование поля фильтрации в них с помощью традиционной математической трехмерной модели фильтрации с пространственно-распределенными гидрогеологическими параметрами является возможным, если эта модель обеспечивает возможность задания анизотропных коэффициентов фильтрации по горизонтали и вертикали, значения которых могут сильно варьировать в пространстве. Результаты моделирования на такой модели будут отражать некое «усредненное» поле напоров или уровней подземных вод, несмотря на возможное реальное отсутствие обводнения в отдельных участках моделируемой области. Тем не менее, по мере привлечения данных о каналовой и порово-трещинной неоднородности массива (спелеологические данные, уточненные данные по тектонике, и т.д.) разрабатываемая модель будет постепенно уточняться и все более адекватно отражать природную гидрогеологическую систему. Эта идея и составляет концептуальную основу разрабатываемой нами предварительной гидрогеологической модели.

Параметрическая база гидрогеологической модели может быть разработана на основе приведенных выше данных геологической и гидрогеологической информации, основными из которых являются данные рельефа, залегания, мощности и нарушенности основных геоструктурных этажей, карстологического районирования (распределения и плотности карстовых форм в пределах зон формирования подземных вод), а также данных об инфльтрационном питании и разгрузке подземных вод.

Математическая модель. В основу гидродинамической математической модели района исследований положена конечно-разностная аппроксимация трехмерного дифференциального уравнения геофильтрации подземных вод в частных производных:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (1)$$

где K_x, K_y, K_z (м/сут) – коэффициенты фильтрации вдоль координатных осей x, y и z соответственно; $H(x, y, z)$ (м) – потенциометрический уровень (напор); $W(x, y, z)$ (сут⁻¹) – функция источников (инфильтрация и т.п.); S_s (м⁻¹) – удельная водоотдача пористой среды пород; t (сут) – время.

Указанное выше дифференциальное уравнение отличается от соответствующего уравнения традиционной планово-пространственной модели для этажных систем водоносных горизонтов заданием коэффициентов фильтрации (в отличие от задания водопроницаемостей в классической планово-пространственной схеме) по причине необходимости моделирования резко переменных и анизотропных по вертикали и горизонтали фильтрационных свойств в области карстовых массивов. Наряду с дифференциальным уравнением (1) для замыкания краевой задачи задаются различные (как внутренние, так и внешние) граничные условия на контурах модели, реках, источниках (в том числе субмариной разгрузки), и водозаборах. После конечно разностной дискретизации краевая задача преобразуется в систему ал-

гебраических уравнений, которая решается численными методами. Для решения указанной краевой задачи на персональном компьютере нами использовалась система моделирования подземных вод *Processing Modflow for Windows* (версия 5.3), позволяющей решать данную задачу [23].

При схематизации района исследований в разрезе учитывалось два структурных этажа, в соответствии с принимаемой концептуальной моделью фильтрации: верхний безнапорный с преимущественно вертикальным нисходящим потоком вод и превалирующими по значению вертикальными коэффициентами фильтрации и нижний – напорно-безнапорный с преимущественно горизонтальным характером фильтрации. Базовый водоупор модели соответствует слабопроницаемым отложениям таврической серии, отметки кровли которых задавались в соответствии с имеющейся информацией по геологическим разрезам. Таким образом, на модели задавалось 2 основных расчетных слоя, верхний из которых соответствует толще карстующихся известняков и играет роль горизонта, обеспечивающего питание нижележащих подземных вод насыщенной зоны. Второй напорно-безнапорный водоносный комплекс на модели схематизирует обводненную толщу, сформированную нижеюрскими породами отложениями таврической серии, четвертичными делювиальными и оползневыми отложениями Южного берега переменной мощности (абсолютные отметки в пределах 50 – 600 м).

Фоновые значения коэффициентов фильтрации пород (в пределах значений от 0,001 до 5 м/сут) задавались переменными в плане и разрезе с учетом состава пород, литературных данных [8, 24, 25]. На фоновое распределение накладывались зоны повышенных коэффициентов фильтрации по участкам тектонических нарушений и активного карста, в которых значения коэффициентов фильтрации увеличивались в диапазоне множителя 1 – 100 (рис.17).

Таким же образом задавалось распределение инфильтрационного питания, фоновое значение которого изменялось по территории от 30 мм/год (мало обводненные зоны, ЮБК) до 1000 мм/год в пределах карстовых массивов яйл. На фоновую картину инфильтрации накладывались коэффициенты увеличения по зонам высокой вертикальной проводимости (рис.18).

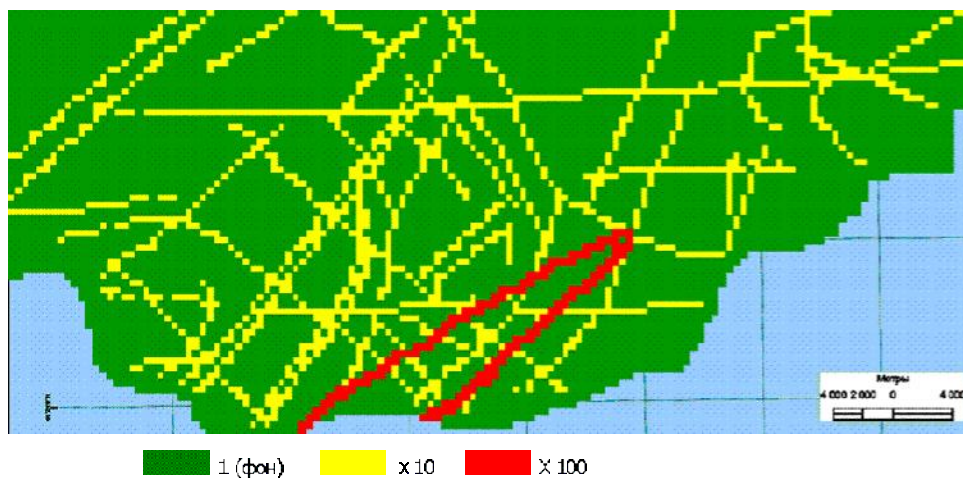
Границы модели выбраны с учетом особенностей геолого-гидрогеологических условий и геоморфологического строения, орогидрографии изучаемой территории. На настоящем предварительном этапе моделирования границы по речной сети, внешние границы, а также внутренние границы выходов подземных вод на поверхность в источниках задавались условиями первого рода.

Конечно-разностная дискретизация модели имеет равномерный шаг разбивки 500 × 500 м, 136 × 60 блоков в каждом из двух горизонтов (всего 16320 расчетных блоков). Общая площадь модели с учетом береговых и склоновых зон составляет 1500 км² (рис.19).

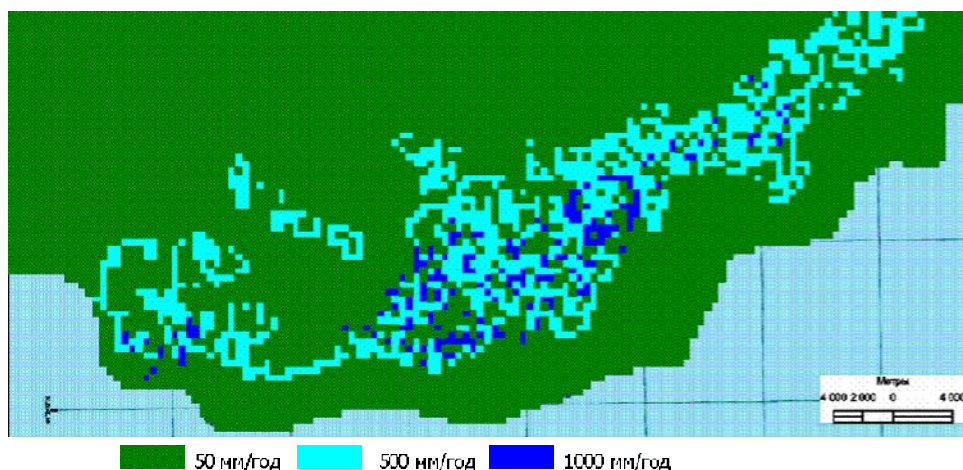
Калибровка модели и предварительные результаты моделирования.

Точность гидрогеологических прогнозов в значительной степени зависит от тех исходных параметров, которые закладываются в расчетную схему.

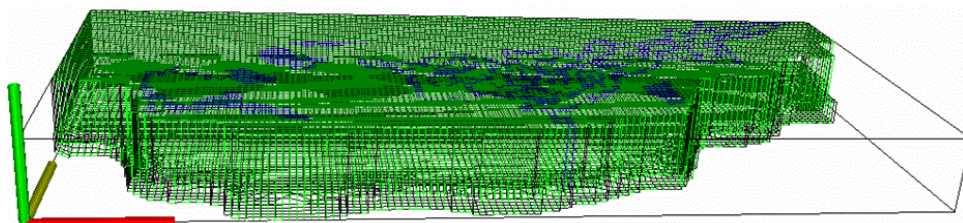
Авторами было выполнено решение имитационных задач с целью определения чувствительности модели к изменению гидрогеологических параметров. В стационарной постановке исследовалось влияние изменения фоновых коэффициентов инфильтрационного питания, коэффициентов вертикаль-



Р и с . 1 7 . Схема задания на модели фоновых аномальных значений коэффициента фильтрации по данным тектоники и трассерного эксперимента.



Р и с . 1 8 . Схема задания на модели фонового и аномального инфильтрационного питания подземных вод в соответствии с условиями развития поверхностного карста.



Р и с . 1 9 . Компьютерное изображение 3-мерной сетки модели.

ной и горизонтальной фильтрации, а также значений этих коэффициентов в пределах зон повышенной проницаемости (карстовых и разломных зон).

При выяснении влияния изменения коэффициентов фильтрации на уровеньный режим подземных вод изучаемых водоносных комплексов были

выполнены варианты постановки имитационных задач с увеличением и уменьшением фоновых значений коэффициентов фильтрации по отдельным участкам модели в 2, 5, 10 раз с наблюдением результирующих модельных уровней (напоров) подземных вод. В окончательном варианте принимались те значения, которые давали наибольшее соответствие полученной картины концептуальной схеме модели.

В результате решения указанных калибровочных имитационных задач выяснено, что модель в целом адекватно реагирует на изменение основных гидрогеологических параметров. Как и следует ожидать, наибольшая реакция уровней (с разницей до 10 м и более) наблюдается при варьировании в 2 – 10 раз коэффициентов фильтрации разломных зон. Изменение фонового значения коэффициентов фильтрации в 2 – 10 раз приводит к незначительному изменению уровней (разница до 10 м). Это объясняется в первую очередь протяженными границами первого рода (на реках и морском контуре), приближенных к отметкам рельефа, то есть значительной граничной «фиксацией» модели. На данном предварительном этапе исследований пока еще не имеется достаточно полных балансовых данных по расходам на гидрогеологических границах.

В результате выполненной таким образом предварительной калибровки модели была получена схема основных направлений фильтрации подземных вод по основному (второму) горизонту (рис.20).

Достоверность модели оценивалась по соответствию модельных уровней наблюдаемой общей картине их распределения и градиентов, определяющих направление потоков подземных вод в соответствии с общей гидрогеологической концепцией их формирования в пределах карстовых массивов, описанной выше.

Анализ полученной модельной карты уровней насыщенной зоны (нижнего горизонта) свидетельствует о том, что уровенный режим и направление потоков подземных вод определяется характером орогидрографии и условиями их формирования на карстовых массивах яйл.

На рис.20 стрелками показаны основные направления движения подземных вод от области формирования карстовых вод массивов яйл к зонам разгрузки в бассейны рек северо-западного склона, родниковых, подрусовых аллювиальных, а также субмаринных разгрузок юго-западного и южного склонов.

В целом полученная модельная карта соответствует принимаемой концептуальной схеме и предварительным оценкам, полученным в [8].

Разгрузка подземных вод с Ай-Петринского массива происходит главным образом в направлении Байдарской долины, и далее, возможно, формирует наиболее значительную субмаринную разгрузку на мысе Айя. Последний факт (подтверждаемый трассерными исследованиями) требует более детальной модельной разработки в ходе дальнейшего совершенствования модели, с уточнением характера потока в напорном горизонте на участке от южной границы Байдарской долины до мыса Айя.

В таблице приведены погоризонтные составляющие водного баланса территории исследований, полученные после предварительной калибровки модели.



Р и с . 2 0 . Основные направления потока подземных вод к зонам разгрузки по результатам предварительной калибровки модели.

Согласно этим данным, прогнозные (модельные) естественные ресурсы оцененной части Горного Крыма, согласно полученной оценке, составляют 471 тыс. м³/сут.

Оцененная ранее по данным дебитов родников (рис.3, 6) суммарная разгрузка подземных вод в виде родникового стока составила примерно 176 тыс. м³/сут [18, 20].

Таким образом, разница составляет 295 тыс. м³/сут. Ее разгрузка, по-видимому, осуществляется в виде донной разгрузки в реки, субмаринной разгрузки и мелкими родниками.

С помощью модели нами была выполнена также предварительная оценка суммарного инфильтрационного питания по площади Ай-Петринского массива (площадь 200 км²), представляющего основной район инфильтрационного формирования подземных вод. Рассчитанное после калибровки модели значение суммарной инфильтрации по этому важному району составило 243900 м³/сут, что соответствует модулю питания 14,11 л/с км², или 445 мм/год. Это в 4 раза превышает значение питания, полученное в среднем по модели (3,6 л/с км²).

Отметим, что приведенные результаты расчетов следует рассматривать как предварительные, в связи с недостаточной детальностью учета исходной информации (приближенность рельефа, границы первого рода на реках

Т а б л и ц а . Погоризонтная оценка суммарного водного баланса территории модели по результатам предварительного моделирования

№ горизонта от поверхности	расход (тыс. м ³ /сут)		
	инфильтрация	разгрузка в реки, родники, субмаринная	вертикальный водообмен с соседним водоносным горизонтом
1	471,092	– 241,084	– 230,008
2	0	– 230,008	– 230,008

и т.п.). Задача дальнейших исследований заключается в уточнении модели, преобразовании ее в нестационарную и постоянно действующую модель юго-западной части Горного Крыма.

Выводы.

– Карстово-трещинные воды имеют широкое распространение в пределах Горного Крыма и характеризуются сложной гидродинамической связью между собой, периодичностью активного инфильтрационного питания и весьма значительными скоростями фильтрации, что обуславливает существенные колебания дебитов родников.

– Глубина залегания карстово-трещинных вод в карбонатных породах зоны насыщения в среднем по Байдарскому району и Ай-Петринской яйле составляет 600 – 200 м.

– В пределах исследуемого района присутствуют крупные линейные зоны движения карстово-трещинных подземных вод, связанные с зонами повышенной тектонической трещиноватости в обрамлении терригенных и вулканогенных пород, что позволяет говорить о достаточно большом объеме субмаринной разгрузки на разных глубинах Черного моря не только в местах контакта карбонатных пород с морем (мыс Айя и др.), но и на значительной части протяженности юрского синклинория, обрамленного терригенно-вулканическими породами субпараллельно береговой линии.

– Результаты предварительного моделирования свидетельствуют о наличии здесь значительных резервов ресурсов подземных вод по сравнению с ранее оцененными. Возможность их более достоверной оценки вызывает необходимость дальнейших исследований.

– Совершенствование модели с целью получения более достоверных данных по ресурсам подземных вод юго-западной части Горного Крыма продолжается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лычагин Г.А.* Меловая система. Нижний отдел // Геология СССР. Т.8. Крым. Ч.1. Геологическое описание.– М.: Недра, 1969.– С.155-178.
2. *Государственная* геологическая карта Горного Крыма. Составлена тематической экспедицией ПГО «Крымгеология» / Ванина М.В., Фиколина Л.А. и др.–М.: Изд. геолого-картографической партии ЦГЕ Министерства геологии СССР, 1986.
3. *Отчет* о результатах предварительной разведки подземных вод на северном склоне юго-западной части Горного Крыма для водоснабжения г.Севастополя (участок Родниковский). 1982-1989.– Симферополь: «Крымгеология», Крымская КГРЭ, 1989.
4. *Отчет* по изучению дистанционными методами структурно-тектонических особенностей Горного и Предгорного Крыма с целью выделения обводненных зон / Пасынков А.А., Коваленко А.П. и др.– Симферополь: «Крымгеология», Крымская КГРЭ, 1984.
5. *Изучение* инженерно-геологических характеристик Ялтинского гидротоннеля и внедрение в проект его ремонтных работ / Шутков Ю.И. и др.– Симферополь: ИМР, 1988.
6. *Ведь И.П.* Климатический атлас Крыма.– Симферополь: Таврия-Плюс, 2000.– 120 с.
7. *Ресурсы* поверхностных вод СССР. Т.6. Украина и Молдавия. Вып.3. Крым.– Л.: Гидрометеиздат, 1966.– 334 с.

8. Приблуда В.Д., Коджастиров А.А., Дублянский В.Н. Баланс подземных вод юго-западной части Горного Крыма // Геологический журнал.– 1979.– т.39, №2.– С.38-46.
9. Дублянский В.Н. Карстовые пещеры и шахты Горного Крыма.– Л.: Наука, 1977.– 180 с.
10. Изучение подземных карстовых полостей УССР с целью выяснения возможности их использования для нужд народного хозяйства. Кадастр глубинных карстовых полостей Крыма. Разд.7. Ласпинский, Агармышский горные массивы и II гряда крымских гор / Дублянский В.И., Шутов Ю.И. и др.– Симферополь: ИМР, 1966.
11. Мойсеенко В.С. Боги, потоки і люди.– Київ: Вид-во «Богдана», 2008.– 91 с.
12. Мельник В.И. Мезоформы рельефа материкового склона Черного моря // Геологический журнал.– 1996.– № 1-2.– С.123-131.
13. Дублянский В.Н., Кикнадзе Т.З. Гидрогеология карста Альпийской складчатой области юга СССР.– М.: Наука, 1984.– 125 с.
14. Изучение режима подземных вод Горного Крыма и прогноз изменений гидрогеологических условий за 1993-1995 гг.– Симферополь: ИМР, 1996.
15. Сводный отчет по изучению режима подземных вод Горного Крыма за 1971-1980 гг.– Симферополь: «Крымгеология», Крымская КГРЭ, 1981.
16. Динамические запасы подземных вод юго-западной части главной гряды крымских гор / Попов К.В. и др.– М.: ВСЕГИНГЕО, 1948.
17. Основные результаты работ Ай-Петринской гидрогеологической станции (базы) ИМР: МГ УССР за 1957-1964 гг. / Дублянский В.Н.– Симферополь, 1967.
18. Отчет о результатах оценки запасов подземных вод по родникам Ливадийского, Ялтинского и Никитского гидрогеологических районов, юго-западной части Главной гряды Крымских гор. Карта эксплуатационных запасов подземных вод по родникам Ливадийского, Ялтинского и Никитского гидрогеологических районов, совмещенная с картой четвертичных отложений / Жарикова К.П., Костин П.И.– Симферополь: «Крымгеология», Крымская КГРЭ, 1974.
19. Региональная оценка запасов подземных вод Горного Крыма. Карта оценки запасов подземных вод Горного Крыма / Неклюдов Г.Д., Жарикова К.П.– Симферополь: «Крымморгеология», 1978.
20. Оценка состояния взаимосвязи подземных и морских вод крымского побережья / Юровский Ю.Г. и др.– Симферополь: ИМР, 1993.
21. Изучение пространственных изменений фильтрационных свойств верхнеюрских известняков, особенностей движения и разгрузки приуроченных к ним подземных вод в юго-западной части Горно-Крымской карстовой области / Лущик А.В., Юровский Ю.Г. и др.– Симферополь: ИМР, 1985.
22. Gunn J. Modelling of conduit flow dominated karst aquifers // Karst water resources. Eds by Günay G., Johnson A.I.– IAHS, Publication 161.– Wallington, UK, 1986.– P.587-596.
23. Ciang W.H., Kinzelbach W. 3D Groundwater modeling with PMWin.– Springer, 2001.
24. Справочное руководство гидрогеолога / Под ред. Максимова В.М.– Л.: Недра, 1967.– 592 с.
25. Формирование эксплуатационных ресурсов подземных вод платформенных структур Украины / Бабинец А.Е., Боровский Б.В., Шестопалов В.М. и др. – Киев: Наукова думка, 1979.– 216 с.

Материал поступил в редакцию 20.10.2008 г.