

УДК 556.382.072(477.75-14)

© В.М. Шестоपालов¹, А.С. Богуславский², А.Б. Климчук³, А.В. Фесенко⁴,
Г.Е. Годенко⁴, 2008

¹ Институт геологических наук НАН Украины, Киев,

² Московский государственный университет, Россия,

³ Украинский институт сейсмологии и карстологии Таврического
университета, Симферополь

⁴ Одесский национальный университет.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ГОРНОГО КРЫМА

Разработана схематизация гидрогеологических условий юго-западной части Горного Крыма. Выполнен модельный анализ основных направлений движения подземных вод из областей питания (карстовых массивов) яйл в предгорные районы и зоны субмаринной разгрузки. Результатом работы является предварительная гидрогеологическая модель как основа для дальнейшей ее разработки с целью создания постояннодействующей математической модели.

Введение. Исследование формирования ресурсов подземных вод Горного Крыма необходимо как для выяснения перспектив улучшения водоснабжения региона, так и с точки зрения развития 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 создание предварительной гидрогеологической модели подземных вод юго-западной части Горного Крыма, которая

может быть использована для анализа состояния их природных ресурсов, защищенности, а также оценки прогнозных эксплуатационных ресурсов для целей водоснабжения.

1. Геолого-гидрогеологические условия юго-западной части Горного Крыма. Территорией исследований настоящей работы является юго-западная часть Крымских гор от г. Балаклава до г. Алушта и их 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 синклинория Юго-западного Крыма с его наиболее прогнутой частью (а) и Сухореченской антиклиналью (б) по Г.А. Лычагину [4] показана на рис. 1.

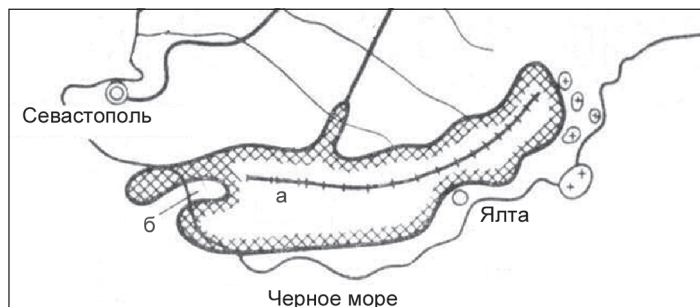


Рис. 1. Тектоническая схема исследуемой территории по Г.А. Лычагину [4]

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

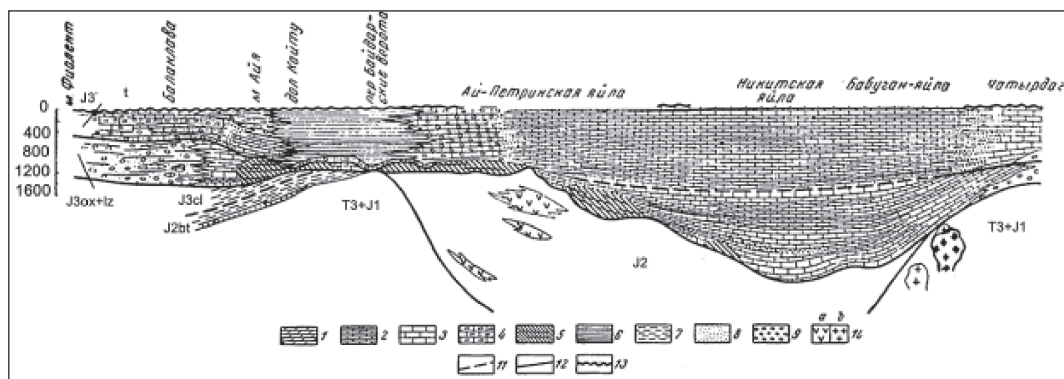


Рис. 2. Продольный стратиграфо-фациальный разрез верхнеюрских отложений Горного Крыма по [4] Условные обозначения: 1 – мергели; 2 – тонкослоистые глинистые известняки; 3 – слоистые известняки; 4 – брекчиевидные известняки; 5 – рифогенные известняки; 6 – флиш; 7 – глины; 8 – песчаники; 9 – конгломераты;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

Комплексная карта-схема геологического строения, составленная по [13,21,22] представлена на рис. 3.

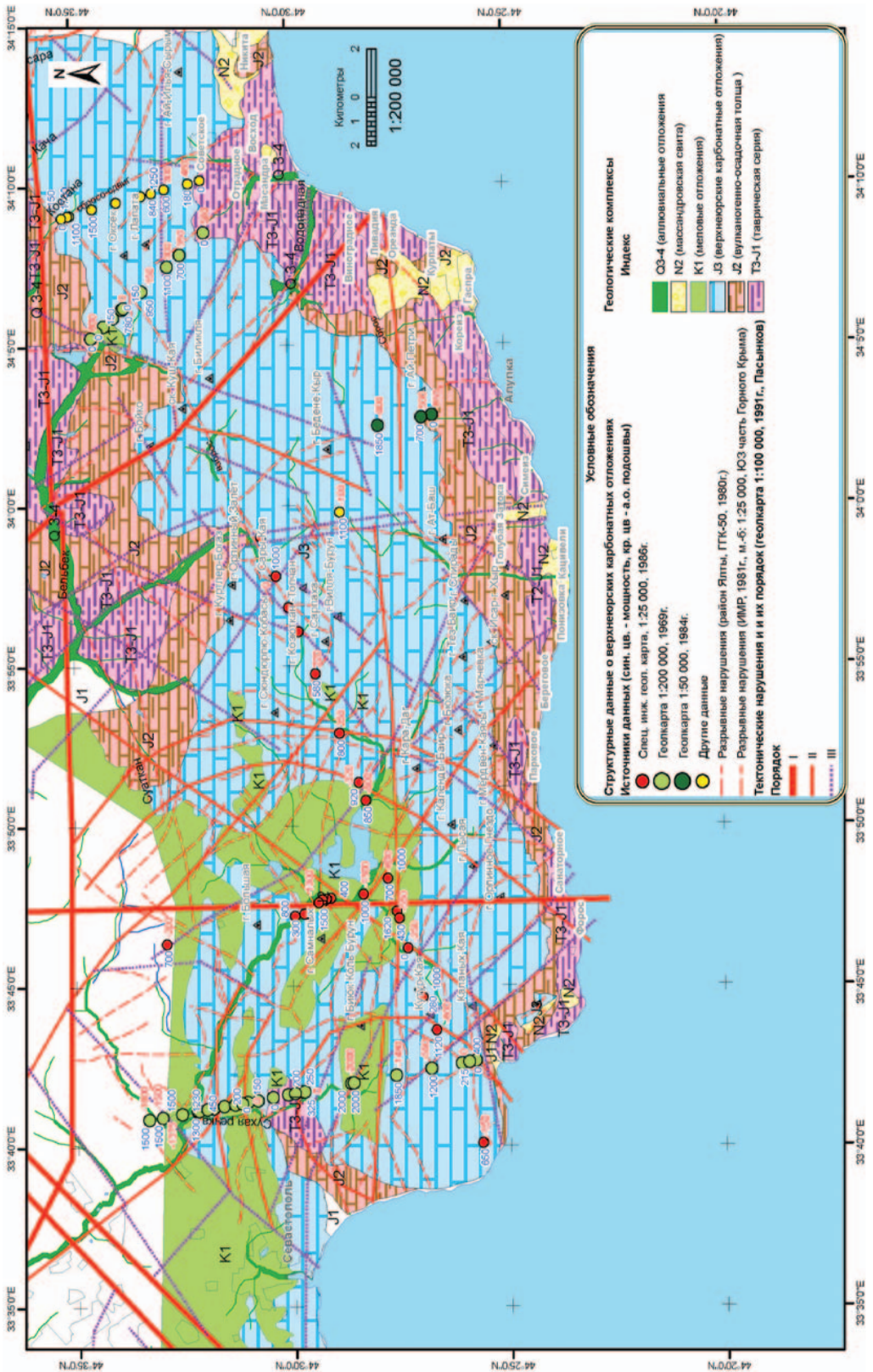


Рис. 3. Карта геологического строения исследуемой территории. Составлено по [13, 21, 22]

Нижний (доверхнеюрский) этаж представляет собой сложную складчато-блоковую систему структур, сложенных песчано-глинистым комплексом средней юры и таврической серии, которые образуют цоколь Главной гряды Крымских гор, в гидрогеологическом аспекте – цокольный водоупор. Обнажаются породы таврической серии в пределах склонов главной гряды как северных (Качинское антиклинальное поднятие), так и южных (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 [15].

Верхнеюрские отложения горного массива начинаются с глинисто-карбонатной толщи келловея. Породы представлены аргиллитами и глинистыми алевролитами с конкрециями сидеритов мощностью до 40 м. Отложения келловея входят в состав цокольного водоупора и практически не обводнены. Выше по разрезу залегают породы нижнего оксфорда, представленные рифогенным комплексом пород – неслоистыми известняками, карбонатными осадочными брекчиями, окаймляющими рифовые тела, и грубослоистыми обломочно-органогенными и оолитовыми известняками. Максимальная мощность этой пачки, установленная в районе Ялтинского гидротоннеля, – около 50 м. В межрифовых понижениях залегают пачки терригенно-обломочных пород нижнего оксфорда. Они представлены переслаиванием карбонатных алевролитов, глинистых и песчанистых известняков и, реже, конгломератов и гравелитов с кварцевым гравием и галькой. Мощность пород нижнего оксфорда изменяется от 150 до 250 м неравномерно по площади, что вполне естественно для рифогенных образований.

Отложения верхнего оксфорда начинаются пачкой обломочных пород: конгломератов, гравелитов, песчаников. Пачка уменьшается по мощности в направлении на юго-восток от 110 м в районе сел Счастливое и Многогоречье до первых метров в районе ск. Балан–Кая и русла р. Суат–Лар. Вышеуказанные породы перекрываются известняками, замещающими их. При этом в разрезе южного склона преобладают слоистые и тонкослоистые разности известняков, а северного – рифогенные, неслоистые и грубообломочные. Наиболее полный разрез верхнего оксфорда наблюдается на южном склоне Ялтинского горного массива, где суммарная его мощность достигает 600 м.

Киммериджский ярус представлен пачкой переслаивающихся тонкоплитчатых и листоватых известняков, которые подстилаются грубослоистыми органогенно-обломочными известняками небольшой мощности. Отложения позднего киммериджа в пределах всего горного Крыма отсутствуют.

ют. Мощность отложений раннего киммериджа составляет 390–410 м. Мощность титонских отложений не превышает 150 м.

Меловые отложения распространены и выходят на дневную поверхность в районе Байдарского водохранилища и вблизи с. Гончарное.

Четвертичный комплекс преимущественно представлен обломочными продуктами физического и химического выветривания, а также аллювиальными отложениями.

Гидрогеологические условия исследуемой территории весьма сложны и до настоящего времени недостаточно изучены. Это подтверждается отсутствием достоверных данных о пространственном распределении пьезометрической поверхности подземных вод в пределах карстовых массивов, сильно изменчивыми и в достаточной мере не изученными направлениями и скоростями движения подземных вод. Сложные гидрогеологические условия – следствие сильной расчлененности рельефа водосборов, наличия карстовых и трещинно-карстовых зон движения подземных вод в известняках до глубин ниже 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 являются карстовые водосборы 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



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

Ай-Петринский массив, который играет главную роль в формировании питания подземных вод района.

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 [1, 8].

Для горных карстовых массивов общеприняты представления о том, что формирование карстовых подземных вод связывается с тремя видами питания: *инфильтрационным* (рассеянное проникновение в почву и коренные 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 массивов занято задернованным карстом. На долю голого карста приходится всего 15% его площади, 70% площади балансового бассейна покрыто лесом [7].

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 расстоянии от десятков до сотен метров и поглощается крупными понорами, зонами трещинного поглощения, пещерами-понорами и шахтами-понорами. В зимний период временные водотоки могут формироваться по поверхности снега и не попадать в зоны трещиноватости, поглощающие поверхностный сток летом. Очагами периодической инфлюации являются и некоторые карстовые воронки, днища которых выполнены суглинистыми отложениями, имеющими низкий коэффициент фильтрации. После дождей и снеготаяния в них могут скапливаться до 1–2 тыс. м³ воды, которая прорывает глинистую пробку и уходит в поноры. 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, проведенных двумя независимыми (гидрометрическим и балансовым) методами показали, что модуль конденсационного стока в расчете на год может составлять 1,77 л/(с·км²).

Инфильтрационное питание в пределах Ай-Петринского массива 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 раз-

вития задернованного карста существенное влияние на величину питания оказывает почвенный покров, и оценка инфильтрации составляет от 66% (среднемощные почвы до 50 см) до 80% (маломощные почвы до 10 см) нормы осадков. На участках массива, покрытых лесом, за счет выпадения горизонтальных осадков (гололед, изморозь, наморозь, роса) лес получает дополнительно 25% годовой суммы осадков. С этих участков не происходит зимой выдувания снега. Поэтому, несмотря на значительные потери на транспирацию, величина питания на таких участках составляет 55-65% нормы осадков [7].

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.

Разгрузка подземных вод осуществляется на склонах массивов (рис. 5).

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

Сток трещинно-карстовых вод в пределах яйлы происходит по трещинно-карстовым зонам, из них наиболее обводненные локализируются



Рис. 5. Карстово-гравитационное русло временного потока подземных вод в верховье р. Водопадная на высоте более 70-80 м выше уреза воды в русле а – общий вид устья подземной части; б – подземное русло; в – выработанное русло временного потока. Фото Фесенко А.В., Годенко Г.Е. (09.2008)

вдоль крупных тектонических нарушений. Разбитая на блоки карбонатная толща подстилается аргиллит-песчаниковым водоупорным слоем.

О значительной глубинности карстования можно судить по глубине разведанных карстовых полостей, достигающих 400 м и более [2,16] (рис. 6), значительная часть которых находится на Ай-Петринской яйле (рис. 7).

Согласно палеорекострукциям уровень Черного моря в течение последнего миллиона лет неоднократно

опускался минимум на 100-200 м по сравнению с существующим (рис. 8). В результате существенно опускались базисы дренирования подземных вод Крымских гор и соответственно активизировалось карстообразование в глу-

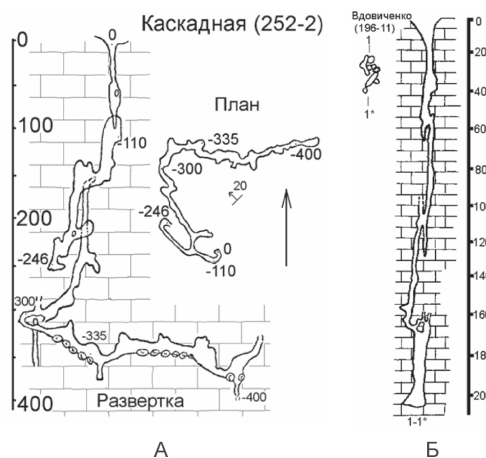


Рис. 6. Разрезы карстовых шахт Каскадная (А) и Вдовиченко (Б) на Ай-Петринской яйле



Рис. 7. Типичные Карстовые формы Ай-Петринского массива Фото Фесенко А.В., Годенко Г.Е. (09.2008)

Рис. 8. Новозвксинский бассейн до и после затопления в результате прорыва Средиземноморских вод [6]



боких частях юрско-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 толщу.

В пользу этой гипотезы говорят также данные о расположении подводных каньонов у берегов Крыма, которые являются палеоруслуями, часто продолжающимися существующие реки [5]. 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 [3,18,25] и воднобалансовым исследованиям [7,14]. Частичная разгрузка в виде источников происходит на севере (северный контур разгрузки) и на юге (южный контур).

На рис. 9 показан фрагмент карты исследуемой территории с результирующими 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 [3]. 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 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 [7].

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 [19]. К последним можно отнести несколько из наиболее крупных источников Крыма со среднегодовым дебитом свыше 100 – 150 л/с: Бюк-Синорский, водопад Массандровский, Учан-Су, Уч-Кош (рис. 10), Бюк-Узеньбаш и др. [19, 20].

Источники характеризуются крайне неравномерными режимами с резко выраженной сезонностью [24].

Состав воды преобладающего числа источников гидрокарбонатный кальциевый, реже гидрокарбонатный магниевый кальциевый с минерали-



Рис. 10. Карстовые родники и участки разгрузки карстово-трещинных подземных вод а, б – карстовые родники в верховье ущелья Уч-Кош; в – разгрузка карстово-трещинных вод в русло р. Черной (истоки реки); г – разгрузка карстово-трещинных вод в русло р. Коккозки (верховье); фото Фесенко А.В., Годенко Г.Е. (09.2008)

зацией 0,2-0,5 г/дм³. Следует отметить, что, несмотря на незначительное количество крупных карстовых источников, до 90% родникового стока приходится именно на них.

Транспорт и разгрузка подземных вод в пределах южных склонов происходит в основном по относительно проницаемым четвертичным отложениям и толще слабопроницаемых отложений таврической серии (алевролиты, аргиллиты и песчаники), а также песчано-глинистым отложениям средней юры. Формирование подземных вод в четвертичных отложениях 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 распространение в верховья рек и горных потоков процессов цементации русловых отложений известковым туфом на площадях с отметками уровня на 1.5-2 м выше от дна рек (рис. 11) 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

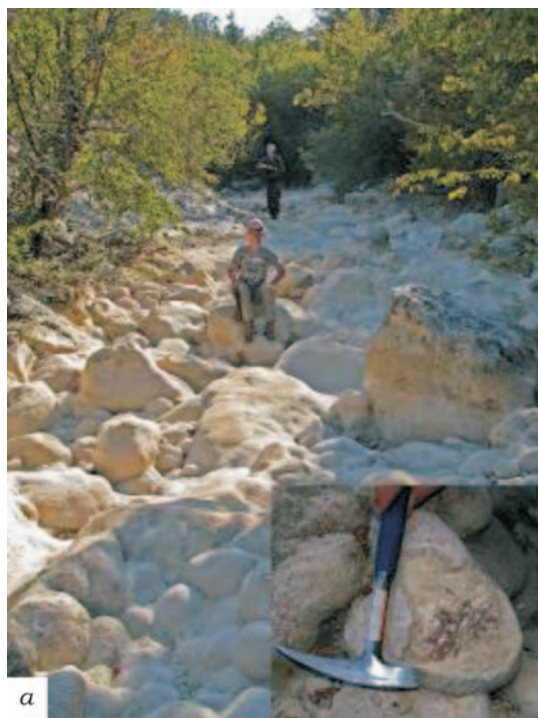


Рис. 11. Цементация русловых отложений а – в верховье реки Черная (у с. Колхозное); б – в районе верховья р. Коккозка (4 км. юго-западнее Большого Каньона). Фото Фесенко А.В., Годенко Г.Е. (09.2008)



горизонтов по зонам 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 субмаринной разгрузки на Севастопольско-Балаклавском и Балаклавско-Форосском участках [23].

Заслуживают внимания результаты воднобалансовых работ в юго-западном Крыму [7], 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 п.г.т. Форос до г. Алушта, 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), и, частично, аллювиальным отложениям рек. 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 очагах активной разгрузки аллювиальных вод может составлять несколько сотен $\text{м}^3/\text{сут}$. Участки опреснения придонных морских вод фиксировались и в каньонах на больших глубинах, и в удалении от берега.

2. Гидрогеологическая модель юго-западной части Горного Крыма.

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

Как уже отмечалось выше, основной гидрогеологической особенностью исследуемой территории является наличие карстовых известняковых плато, сформированных верхнеюрскими известняками большой мощности (500 м и более). Их площадь в пределах рассматриваемого участка – до 250 км^2 , большую часть составляют яйлы Ай-Петринского массива. Эта территория – мощный аккумулятор вод атмосферных осадков и основная зона формирования и питания подземных вод района [17].

Общая концептуальная модель питания карстовых подземных вод хорошо иллюстрируется схемой, предложенной в 1986 г. Дж. Ганном [12], рис. 12. 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).

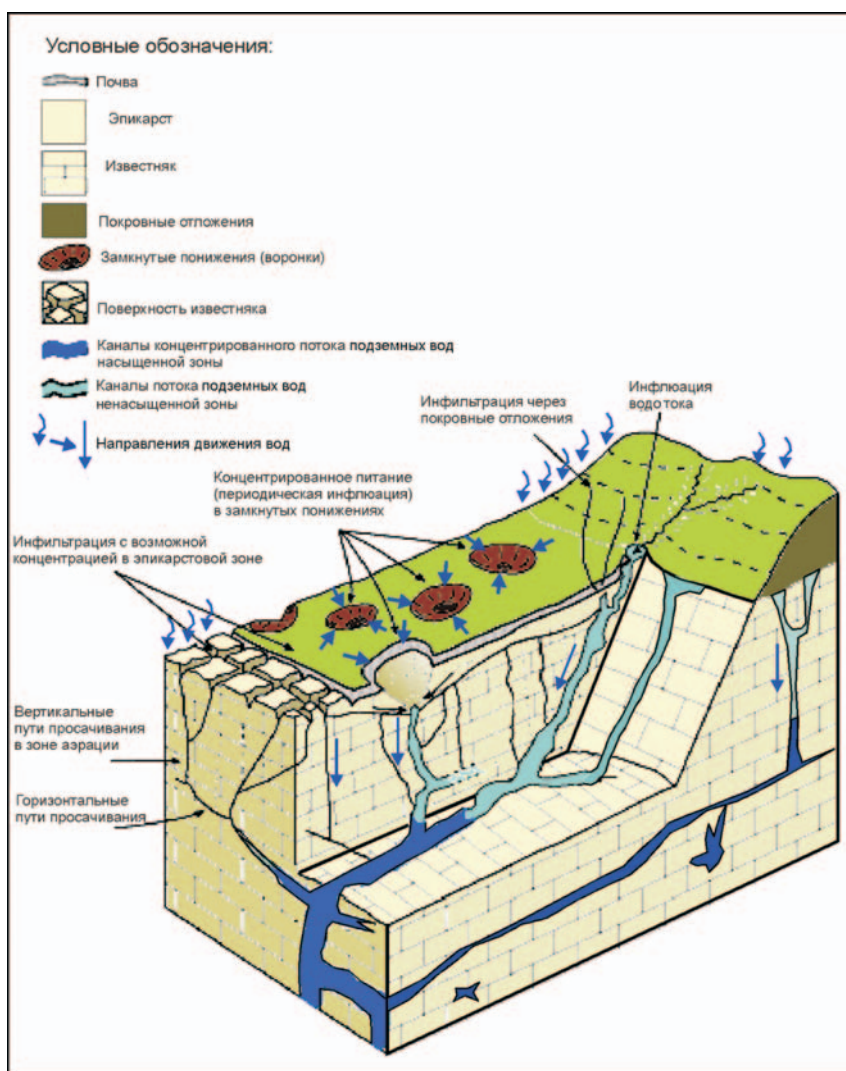


Рис. 12. Концептуальная схема питания карстовых подземных вод Дж. Ганна [12] с добавлениями авторов

Ниже зоны аэрации, мощность которой может достигать сотен метров, происходит смена общего направления потока на преимущественно субгоризонтальное и формируется зона насыщения карстовых вод. Она 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*, характеризующаяся относительно равномерной и высокой проницаемостью и значительными емкостными свойствами. Она получает главным образом инфильтрационное питание, имеет изменчивую мощность в пределах от первых до десятков метров и содержит безнапорные воды, обычно образующие подвешенный водоносный горизонт (верхо-

водка), 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. Инфлюационные минуют эпикарстовую зону и быстро попадают в зону аэрации, где движение 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-эрозийных 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 или полная их разгрузка происходит в источниках у подножия склонов, где располагаются пещеры-источники (Скельская, Узунджа, Желтая, Пания и др.), см. рис. 10.

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 (канальной и порово-трещинной) в условиях переменного питания различных видов.

Концептуальная схема питания и разгрузки подземных вод карстового массива в системе “суша-море” показана на рис. 13.

Несмотря на столь сложную гидродинамику карстовых сред, моделирование поля фильтрации в них с помощью традиционной математической трехмерной модели фильтрации с пространственно-распределенными гидрогеологическими параметрами возможно, 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 канальной 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 нарушения основных геоструктурных этажей, карстологического районирования (распределения и плотности карстовых

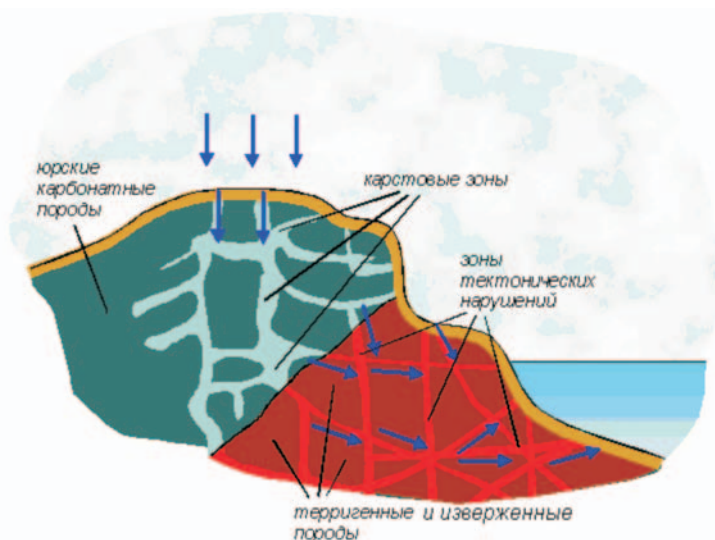


Рис. 13. Концептуальная гидрогеологическая схема питания и разгрузки карстовых подземных вод в системе “суша-море” основной части Юго-западного синклиория Горного Крыма

форм в пределах зон формирования подземных вод), а также данных об инфильтрационном питании и разгрузке подземных вод.

2.2. *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 – потенциметрический уровень (напор);

$W(x,y,z)$, сут⁻¹ – функция источников (инфильтрация и т.п.);

S_s , м¹ – удельная водоотдача пористой среды пород;

t , сут – время.

Указанное выше дифференциальное уравнение отличается от соответствующего уравнения традиционной плано-пространственной модели для этажных систем водоносных горизонтов заданием коэффициентов фильтрации (в отличие от задания водопроводимостей в классической плано-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 субмаринной разгрузки) и водозаборах. После конечно разностной дискретизации краевая задача преобразуется в сис-

тему алгебраических 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), позволяющая решать данную задачу [11].

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 преобладающими 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 нижнеюрскими 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, на основании литературных данных [7, 9, 10]. 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. 14.

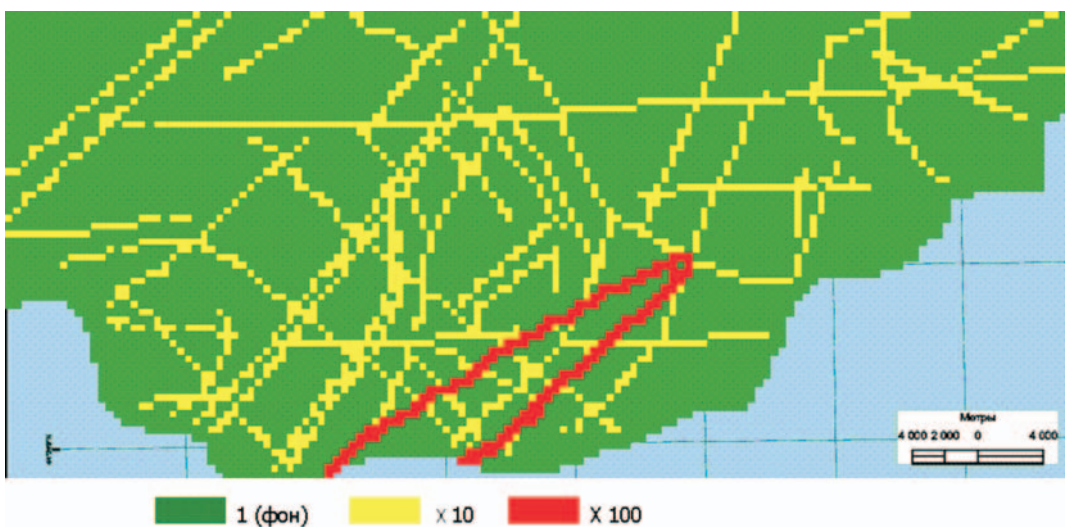


Рис. 14. Схема задания на модели фоновых аномальных значений коэффициента фильтрации по данным тектоники и трассерного эксперимента

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. 15).

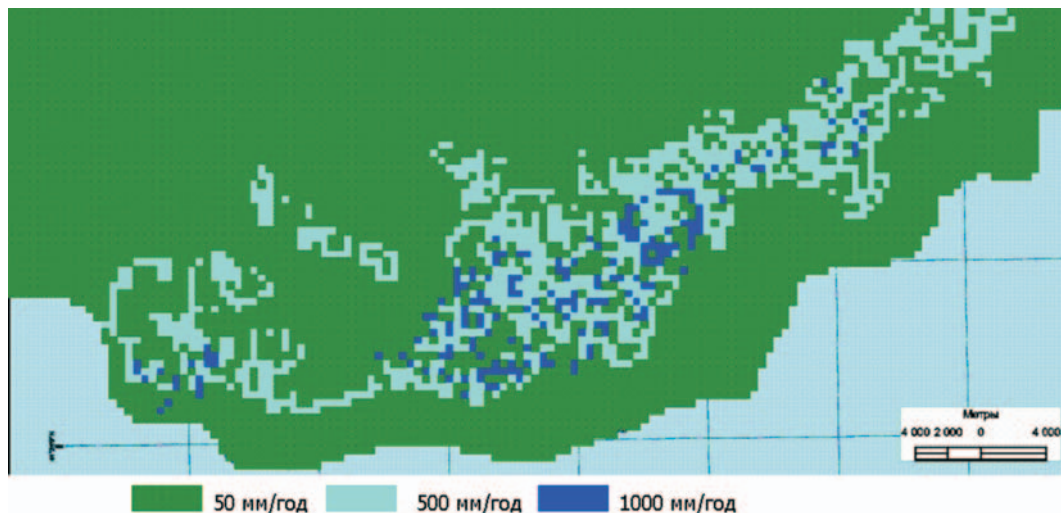


Рис. 15. Схема задания на модели фонового и аномального инфильтрационного питания подземных вод в соответствии с условиями развития поверхностного карста

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.

2.3 Калибровка модели и предварительные результаты моделирования. Точность гидрогеологических прогнозов в значительной степени зависит от тех исходных параметров, которые закладываются в расчетную схему.

Чрезвычайно сложно, да и не всегда возможно бывает определить с помощью лабораторных или полевых опытно-фильтрационных работ (ОФР) величины коэффициента фильтрации пород слабопроницаемых отложений. Получив числовые значения параметров для отдельных точек территории, весьма трудно бывает установить их распределение по площади. Лабораторные исследования зачастую не обеспечивают необходимой достоверности определяемых параметров, а ОФР в большом объеме не проводятся ввиду их высокой стоимости. Таким образом, территории оказываются охарактеризованными только в отдельных точках. В этом случае в сложных природных условиях известные приемы ручной и машинной интерполяции становятся практически мало приемлемыми. Усреднение параметров

по всей территории или на отдельных ее участках может привести к существенным погрешностям или даже неверным результатам прогноза. В рассматриваемом же случае сильно нарушенных и неоднородных по проницаемости пород карстовых массивов лабораторные определения коэффициентов фильтрации вообще не пригодны, поскольку представительные блоки геологической среды имеют большие размеры вследствие наличия зон быстрой фильтрации. Минимальный линейный размер блоков модели 500 м не имеет смысла уменьшать, поскольку при этом теряется его “представительность” с точки зрения зон быстрой фильтрации (вертикальных и горизонтальных каналов и трещин).

Еще сложнее обстоит дело с определением величины суммарного питания водоносного горизонта. Обычно инфильтрационное питание оценивается ориентировочно на основании анализа климатических условий района и реже – по данным режимных наблюдений; глубинное питание вообще часто не может быть оценено. Распространение этих результатов на всю исследуемую территорию всегда является условным.

В связи с указанными проблемами 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 вертикальной и горизонтальной фильтрации, а также значений этих коэффициентов в пределах зон повышенной проницаемости (карстовых и разломных).

При выяснении влияния изменения коэффициентов фильтрации на уровенный 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), приближенными 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. 16.

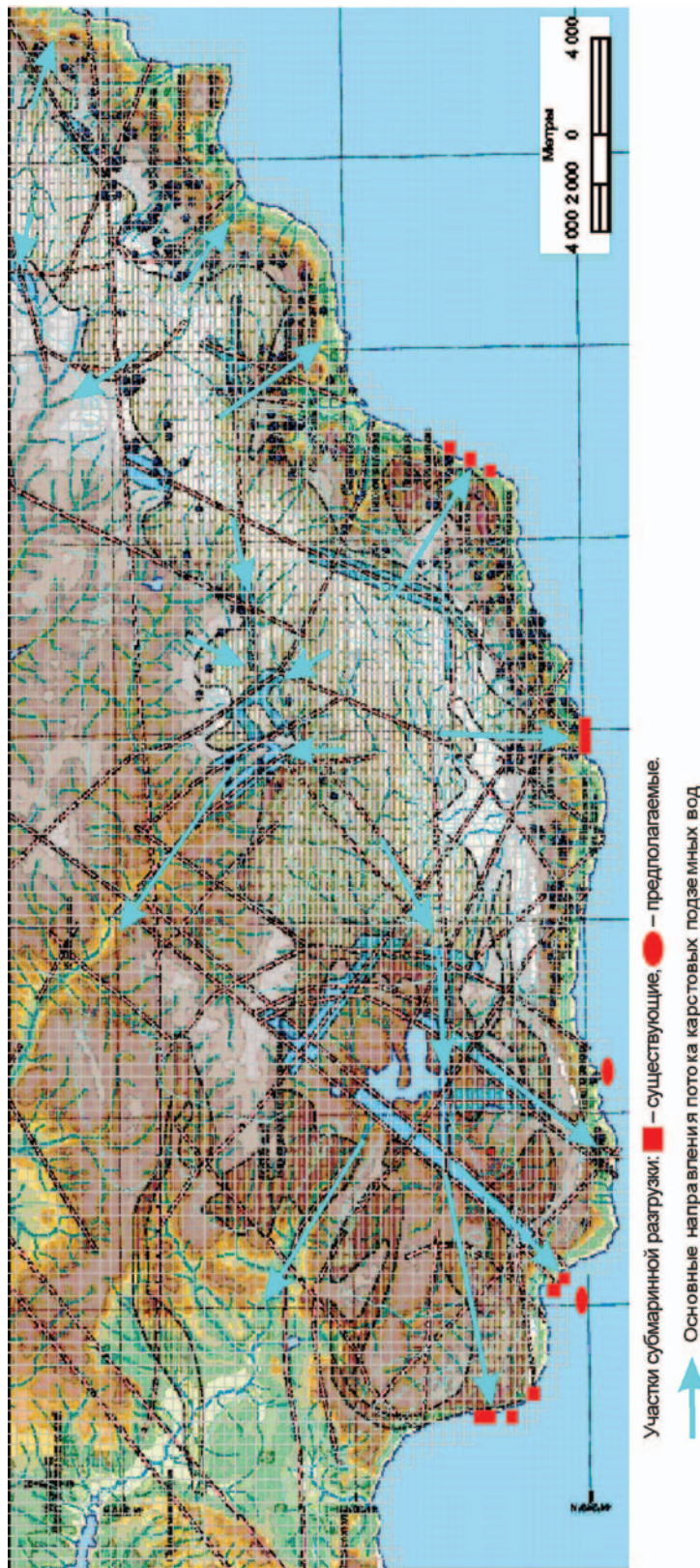


Рис. 16. Основные направления потока подземных вод к зонам разгрузки по результатам предварительной калибровки модели

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. 16 стрелками показаны основные направления движения подземных вод от области формирования карстовых вод к зонам разгрузки.

В целом полученная модельная карта соответствует принимаемой концептуальной схеме и предварительным оценкам, полученным в [7].

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.

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

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

Оцененная ранее по данным дебитов родников (см. рис. 3, 5) суммарная разгрузка подземных вод в виде родникового стока составила примерно 176 тыс. м³/сутки [20,23].

Таким образом, разница составляет 295 тыс. м³/сутки. Она, по-видимому, складывается из донной разгрузки в реки, субмаринной и разгрузки 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 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.

- Результаты предварительного моделирования распределения ресурсов подземных вод Горного Крыма и оцененных дебитов родников свидетельствуют о том, что субмаринная разгрузка подземных вод Черного моря достигает значительных размеров (более сотни тыс м³/сутки. Она формируется за счет наиболее стабильных ресурсов карстовых вод и может представлять значительный интерес для питьевого водоснабжения населения.

- Усовершенствованная на следующем этапе выполнения работ модель оценки ресурсов карстово-трещинных подземных вод позволит значительно продвинуться в решении актуальных прикладных задач водоснабжения районов предгорного Крыма, оценки рисков антропогенного загрязнения этих вод, обоснования мероприятий по его минимизации и прекращению. В дальнейшем по мере детализации и фрагментации модели ее данные могут быть использованы при решении инженерно-геологических задач.

1. *Ведь И.П.* Климатический атлас Крыма. – Симферополь: Таврия-Плюс, 2000. – 120 с.
2. *Дублянский В.Н.* Карстовые пещеры и шахты Горного Крыма. – Л.: Наука, 1977. – 180 с.

3. Дублянский В.Н., Кикнадзе Т.З. “Гидрогеология карста Альпийской складчатой области юга СССР”. – М.: Наука, 1984. – 125с.
4. Лычагин Г.А. Меловая система. Нижний отдел / Геология СССР. Т. 8. Крым. ч. 1. Геологическое описание. – М.: Недра, 1969. – С. 155–178.
5. Мельник В.И. Мезоформы рельефа материкового склона Черного моря. // Геол. журн., № 1-2, 1996. – С. 123-131.
6. Мойсеенко В.С. Боги, потоки і люди. Вид-во “Богдана”, Київ. – 2008 – 91 с.
7. Приблуда В.Д., А.А. Коджаспиров, В. Н. Дублянский. Баланс подземных вод юго-западной части Горного Крыма // Геол. журн., 1979. – 39 – № 2 – С. 38-46.
8. Ресурсы поверхностных вод СССР. – 6. Украина и Молдавия. Вып. 3. Крым. – Л.:4 Гидрометеиздат, 1966. – 334 с.
9. Справочное руководство гидрогеолога. / Под ред. В.М.Максимова. – Л.: Недра, 1967. – 592 с.
10. Формирование эксплуатационных ресурсов подземных вод платформенных структур Украины. (Бабинец А. Е., Боровский Б. В. ,Шестопалов В. М. и др. – Киев: Наук. думка, 1979. – 216 с.
11. *Ciang W.H and W. Kinzelbach.* 3D Groundwater modeling with PMWin. – Springer, 2001.
12. *Gunn, J. (1986):* Modelling of conduit flow dominated karst aquifers. In Gьnay, G. & Johnson, A.I. (eds), Karst water resources. IAHS, Publication 161: 587-596. Wallington, UK.
Отчеты:
13. Государственная геологическая карта Горного Крыма. Составлена тематической экспедицией ПГО “Крымгеология”. Авторы М.В. Ванина, Л.А. Фиколина и др. – Издание геолого-картографической партии ЦТЕ Министерства геологии СССР, 1986.
14. Динамические запасы подземных вод юго-западной части главной гряды Крымских гор. К.В. Попов и др. – ВСЕГИНГЕО, 1948.
15. Изучение инженерно-геологических характеристик Ялтинского гидротоннеля и внедрение в проект его ремонтных работ. Ю.И. Шутов и др.– Симферополь, ИМР, 1988.
16. Изучение подземных карстовых полостей УССР с целью выяснения возможности их использования для нужд народного хозяйства. Кадастр глубинных карстовых полостей Крыма. Раздел 7. Ласпинский, Агармышский горные массивы и II гряда Крымских гор. В.И. Дублянский, Ю.И. Шутов и др. – Симферополь, ИМР, 1966.
17. 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.
18. Изучение режима подземных вод Горного Крыма и прогноз изменений гидрогеологических условий за 1993-1995. – Симферополь, ИМР, 1996.
19. Основные результаты работ Ай-Петринской гидрогеологической станции /базы/ ИМР: МГ УССР за 1957-1964. В.Н. Дублянский. – Симферополь, 1967.
20. 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. – “Крымгеология”, Крымская КГРЭ, 1974.
21. Отчет о результатах предварительной разведки подземных вод на северном склоне юго-западной части Горного Крыма для водоснабжения г. Севастополя (участок Родниковский). 1982-1989. – Крымская гидрогеологическая экспедиция объединения “Крымгеология”, 1989.
22. Отчет по изучению дистанционными методами структурно-тектонических особенностей Горного и Предгорного Крыма с целью выделения обводненных зон. Па-

сынков А.А., Коваленко А.П. и др. – Симферополь, Объединение “Крымгеология”, Крымская ГГЭ, 1984.

23. Оценка состояния взаимосвязи подземных и морских вод крымского побережья. Ю.Г. Юровский и др. – Симферополь, ИМР, 1993.
24. Региональная оценка запасов подземных вод Горного Крыма. Карта оценки запасов подземных вод Горного Крыма. Г.Д. Неклюдов, К.П. Жарикова. – Объединение “Крымморгеология”, 1978.
25. Сводный отчет по изучению режима подземных вод Горного Крыма за 1971-1980. – Симферополь, Крымская гидрогеологическая экспедиция объединения “Крымгеология”, 1981.

Розроблено схематизацію гідрогеологічних умов південно-західної частини Гірського Криму. Виконано модельний аналіз головних напрямків руху підземних вод від областей живлення (карстових масивів) яйл у передгірні райони та зони субмаринного розвантаження. Результатом роботи є попередня гідрогеологічна модель як основа для подальшої її розробки з метою створення постійнодіючої математичної моделі.

The schematization of hydrogeological conditions of the south-west Mountain Crimea is developed. The modeling analysis is performed of principal directions of groundwater movement from the recharge zones (mountain karst plateaus) to submontane areas and zones of submarine groundwater discharge. In the result the preliminary hydrogeological model is developed as the base for further its improvement and transformation into the permanent-action model.