

Маслов А.А., Самарцев В.Н., Гринеvский С.О., Преображенская А.Е., Лехов В.А.,
Филимонова Е.А., Барановская Е.И., Глухова С.А., Харитоновa Н.А., Поздняков С.П.
(МГУ им. М.В. Ломоносова, геологический ф-т, кафедра гидрогеологии)

ОЦЕНКА РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОДЗЕМНЫХ ВОД КРЫМА НА ОСНОВЕ РЕГИОНАЛЬНОЙ ГЕОФИЛЬТРАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПОЛУОСТРОВА

*На основе систематизированных фондовых материалов и анализа закономерностей формирования инфильтрационного питания в различных ландшафтно-климатических условиях полуострова создана региональная геофильтрационная модель Крыма, удовлетворительно воспроизводящая современные условия питания подземных вод и сложившееся распределение водоотбора. На построенной модели, с учетом выявленных водододефицитных участков и ограничений, накладываемых гидрохимическими условиями основных эксплуатируемых водоносных горизонтов, выполнена оценка ресурсного потенциала подземных вод Крыма. **Ключевые слова:** ресурсный потенциал подземных вод, естественные ресурсы подземных вод, инфильтрационное питание, взаимодействие подземных и поверхностных вод, дефицит удовлетворения потребности в воде, качество подземных вод, региональное геофильтрационное моделирование.*

Maslov A.A., Samartsev V.N., Grinevskiy S.O., Preobrazhenskaya A.E., Lekhov V.A., Filimonova E.A.,
Baranovskaya E.I., Glukhova S.A., Kharitonova N.A., Pozdnyakov S.P.
(Lomonosov Moscow State University)

ASSESSMENT OF POTENTIAL GROUNDWATER RESOURCES IN CRIMEA ON THE BASIS OF THE PENINSULA REGIONAL GROUNDWATER FLOW MODEL ЗАМЕНИТЬ И СДЕЛАТЬ ПРОПИСНЫМИ

*On the basis of systematized background materials and analysis of patterns of recharge in different landscape and climatic conditions of the peninsula, a regional flow model of Crimea was created, which satisfactorily reproduces the current conditions of formation of groundwater resources and the existing distribution of water withdrawals. On the basis of the constructed model, taking into account the identified water scarce areas and the limitations imposed by the hydrochemical conditions of the main exploited aquifers, the resource potential of groundwater in Crimea was assessed. **Keywords:** groundwater resource potential, natural groundwater resources, groundwater recharge, groundwater-surface water interaction, water demand satisfaction deficit, groundwater quality, regional flow modeling.*

Оценка ресурсного потенциала пресных подземных вод Крыма выполнена гидрогеодинамическим методом на специально разработанной региональной геофильтрационной модели полуострова в рамках контракта с АО «Центральное ПГО» на выполнение работ по геологическому изучению недр в целях выявления новых месторождений питьевых подземных вод на территории Республики Крым.

С 2014 г. произошло существенное изменение водохозяйственной обстановки на территории Крыма, кратко характеризующееся тремя основными позициями:

1. Источниками водоснабжения Крыма сегодня являются поверхностные воды водохранилищ и подземные воды, добываемые скважинами и каптажами.

2. Ранее (до 2014 г.) более 80 % потребности региона в воде обеспечивалось за счет днепровской воды, поступающей по Северо-Крымскому Каналу (СКК).

3. После прекращения подачи воды по СКК в 2014 г. возникла проблема дефицита пресной воды, потребовавшая принятия неотложных мер по разработке новых схем обеспечения водой Республики Крым и г. Севастополь.

Общий расход днепровской воды, поступающей по СКК, который начал функционировать в 1963 г., составлял в 1975–1991 гг. около 5,7 млн м³/сут. Запасы подзем-

ных вод, учтенные в 2022 г. Государственным балансом запасов, составляют 1,185 млн м³/сут., существенная доля запасов оценена в условиях фильтрационных потерь воды из СКК. При отсутствии поступления днепровской воды рост водоотбора подземных вод с 2014 по 2022 г. составил 250 % — по данным [3], общий отбор подземных вод практически монотонно увеличивался примерно с 200 тыс. м³/сут в 2015 г. до порядка 500 тыс. м³/сут в 2021 г.

Сложные условия формирования подземного стока Крыма, высокая уязвимость эксплуатации подземных вод интрузиями морских вод, особенно учитывая резкое изменение действующих факторов после 2014 г., предопределили разработку региональной геофильтрационной модели, как инструмента эффективной оценки прогнозных эксплуатационных ресурсов подземных вод Республики Крым. Фактически, в условиях напряженного баланса водообеспечения, с одной стороны, неравномерной эксплуатационной нагрузки на подземные воды как по площади, так и в многолетнем разрезе с другой стороны, такая оценка может быть выполнена только гидродинамическим методом моделирования геофильтрации с учетом взаимосвязи поверхностных и подземных вод.

Оценка обеспеченности потребностей населения ресурсами подземных вод для питьевого и хозяйственно-

бытового водоснабжения выполнена в сложившейся к 2023 г. водохозяйственной обстановке при фактической эксплуатационной нагрузке на подземные воды. При определении перспективной потребности в подземных водах за основу взят комплексный градостроительный документ — Единая схема водоснабжения и водоотведения Республики Крым, утвержденная в редакции постановления Совета министров Республики Крым от 15.11.2021 № 682.

Выполнение оценки ресурсного потенциала пресных подземных вод Крыма с помощью геофильтрационного моделирования позволит дать ответы на вопросы:

1. Почему при наличии запасов пресных подземных вод в общем количестве 1 185 тыс. м³/сут и фактическом водоотборе порядка всего 500 тыс. м³/сут существуют дефициты даже в системе централизованного водоснабжения?

2. Почему при отборе подземных вод менее величины утвержденных запасов существуют проблемы качества подземных вод?

3. Как Крымский полуостров обеспечен ресурсами пресных подземных вод в сложившейся водохозяйственной обстановке?

Методической основой оценки ресурсного потенциала подземных вод является методика, разработанная НППФ «ГИДЭК» и неоднократно примененная для региональных построений, например [1], для территории Российской Федерации.

При построении карты современного инфильтрационного питания подземных вод рассмотрены процессы формирования баланса влаги на поверхности земли, в зоне аэрации (ЗА) и инфильтрационного водообмена поверхностных и подземных вод — от выпадения осадков на поверхность суши до их поступления в поверхностные и грунтовые воды [8]. При таком подходе величина инфильтрационного питания (ИП) оценивается, как расход влаги, поступающий на уровень грунтовых вод (УГВ), который формируется в зависимости от климатических, ландшафтных и гидрогеологических условий [2]. Рассматривая процессы трансформации влаги на поверхности земли и в зоне аэрации на основе многолетних рядов метеорологических характеристик, определяющих водный и радиационно-тепловой баланс Крымского полуострова, по результатам геогеологического моделирования можно составить уравнение среднеегодового годового водного баланса (мм/год):

$$O = ET + C + W,$$

где O — осадки; ET — суммарная величина испарения и транспирации — эвапотранспирация; C — поверхностный (склоновый) сток; W — инфильтрация.

Использование геогеологического моделирования формирования водного баланса на поверхности земли и в ЗА для оценки инфильтрационного питания подземных вод в региональном масштабе основано на поэтапном решении следующих задач [2].

1. Районирование территории по комплексу метеорологических, ландшафтных, почвенных, гидрологических и гидрогеологических факторов с выделением участков территории (типовых ландшафтов), отличающихся по условиям формирования ИП.

2. Построение расчетных моделей инфильтрации для выделенных типовых условий его формирования (ландшафтов).

3. Моделирование водного баланса на поверхности земли и в ЗА для различных ландшафтно-климатических условий территории и количественная оценка его среднееголетних составляющих — суммарной эвапотранспирации, поверхностного (склонового) стока и инфильтрации.

4. Верификация расчетных геогеологических моделей и калибровка их параметров на основе сопоставления результатов моделирования с фактическими данными.

5. Построение итоговой карты среднееголетнего инфильтрационного питания подземных вод.

Такой подход к оценке ИП был успешно апробирован при построении региональных гидрогеодинамических моделей для оценки ресурсного потенциала подземных вод территории Калужской, Смоленской и некоторых других областей, а также Азово-Кубанского артезианского бассейна и Саранского промрайона.

Особенностью инфильтрационного водообмена на территории Крымского полуострова является то, что в его высокогорной части формирование ИП имеет локально-инфлюационный характер, что связано с интенсивным развитием поверхностного карста в юрских известняках, неравномерной трещиноватостью пород таврической серии и сильной расчлененностью рельефа [7]. Это определяет невозможность использования геогеологического моделирования для оценки ИП на этой части территории. Для площади горных плато и склонов применен следующий подход. Используя высокоразрешимую базу данных «Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration», на основе водно-энергетического подхода М.И. Будыко были рассчитаны балансово-допустимые величины суммарного стока в горной части, которые в среднем меняются от 100 до 500 мм/год [10]. Эти величины согласуются в целом с характеристиками стока верховьев рек, протекающих в Крыму, а также с данными экспериментальных водно-балансовых исследований на закарстованных плато Ай-Петринской яйлы [7] и результатами эпигнозного геогеологического моделирования родникового стока Скельского источника в верховьях бассейна р. Черная [6]. Основываясь на этих данных, приняты начальные величины ИП: для горных склонов — в диапазоне 30–70 мм/год, для плато — 150–500 мм/год, которые далее уточнялись в ходе калибровки геофильтрационной модели.

При разработке региональной геофильтрационной модели, прежде всего, был выполнен один из базовых этапов геофильтрационной схематизации — переход от гидрогеологической стратификации, используемой для описания гидрогеологических условий Крыма, к пластовой схематизации с выделением расчетной области

потоков подземных вод. Вертикальная гидрогеологическая стратификация включает 20 гидрогеологических подразделений — 12 водоносных горизонтов и 8 относительно слабопроницаемых горизонтов. Взаимосвязь поверхностных и подземных вод полуострова в модели задавалась в виде трех основных процессов: площадного инфильтрационного питания; взаимосвязи с основными реками; родниковой разгрузкой и разгрузкой в море.

Для учета площадной разгрузки подземных вод в Черное и Азовское моря внешняя плановая граница гидрогеологической структурной модели была увеличена на 10 км от береговой линии полуострова. В вертикальном разрезе нижняя граница модели ограничивается подошвой валанжин-барремского водоносного горизонта, достигающей отметок глубин ~ 9,5 км, а верхняя — Цифровой Моделью Рельефа (ЦМР), полученной по данным радарной топографической съемки (проект SRTM), достигающей отметки 1 533 м (вершина горы Роман-Кош). Корректность ЦМР проекта SRTM была подтверждена сравнением с рельефом топографической карты масштаба 1:200 000.

В основу построения гидрогеологической структурной модели Крымского полуострова закладывались следующие основные принципы:

- выделенные модельные слои геофильтрационной модели должны совпадать с плановыми границами распространения гидрогеологических подразделений Крымского полуострова;

- допускается выклинивание каждого из 20 выделенных слоев, то есть наличие областей строго нулевой мощности;

- в случае выхода кровли модельного слоя на дневную поверхность, абсолютные отметки поверхности кровли должны соответствовать отметкам ЦМР.

В связи с отсутствием равномерных точечных данных для контроля расположения модельных слоев в пространстве и учитывая, что в соответствии с геологической изученностью Крыма, распространение большей части выделенных модельных слоев не сплошное (т.е. содержит разрывы сплошности), предложен подход с использованием опорных поверхностей, полученных с высокой достоверностью, проходящих через всю площадь структурной гидрогеологической модели. Принятый подход позволил осуществить контроль сумм мощностей для минимизации накопления ошибок при их суммировании по каждому модельному слою. На основе анализа фондовых материалов выбраны следующие наиболее изученные опорные поверхности:

- кровля *олигоцен-нижнемиоценового водоупорного горизонта*. Выбрана из-за наличия большого объема данных в связи с однозначностью идентификации глинистого олигоцен-нижнемиоценового водоупорного горизонта, преимущественно при бурении совершенных скважин для хозяйственно-питьевого водоотбора из среднемиоценового водоносного горизонта;

- подошва *валанжин-барремского водоносного горизонта*. Является наиболее полно изученной границей среди нижних модельных слоев и характеризуется повсе-

местным распространением на равнинной части Крымского полуострова;

- *цифровая модель рельефа*. В связи с выходом на дневную поверхность коренных пород выделенных стратиграфических единиц возможно комплексирование данных для кровель, полученных по фондовым данным со скважинной информацией (участки подземного залегания) и по ЦМР (участки выхода на дневную поверхность).

В целом полученные построения (рис. 1) удовлетворительно соответствуют существующим. Дополнительно в геофильтрационной схеме, заданием соответствующих коэффициентов перетока учтена общая новейшая структура Крымского полуострова, представляющая собой четыре субширотных блока или ступени, в плане несколько смещенных друг относительно друга к востоку [5]. С севера на юг это Тарханкутско-Джанкойский (I), Новоселовский (II), Каламитско-Арабатский (III) и Горно-Крымский (IV) блоки [4]. Три северных блока расположены в пределах равнинного Крыма [5], они разделяются мегалинеаментами, отражающими глубинные разломы, и имеют закономерное строение: при общем понижении поверхности и рельефа блоков с юга на север и с запада на восток южные их части приподняты, относительно северных, а восточные — ниже западных [5].

Численная реализация геофильтрационной схемы выполнена для программы MODFLOW 6 [9] в интерфейсе ModelMuse 5 [11], разработанной американской геологической службой (USGS). Выбор программных средств обусловлен возможностью использовать неструктурированную расчетную сетку, что позволяет, по необходимости, выполнять прогнозные расчеты для отдельного водозабора, не создавая модель-врезку, дополнительную к региональной.

Размер расчетной области модели Крыма составляет 345,6×213,6 км. Основным шагом дискретизации выбран равным 800 м, что с учетом возможности шестикратного снижения шага в районе граничных условий второго и третьего рода достигает порядка 10 м.

В соответствии с методикой гидрогеодинамических расчетов, в первую очередь проведена калибровка разработанной региональной модели стационарного потока подземных вод, отвечающего сложившемуся к настоящему времени суммарному водоотбору и инфильтрационному питанию. В качестве калибрационных критериев принято воспроизведение на модели хорошо задокументированных фактических наблюдений, которые включают как напоры подземных вод, так и расходы поверхностных водных объектов, что в условиях Крымского полуострова особенно актуально из-за отсутствия в модели транзитного поверхностного стока.

Опорное калибровочное решение получено на вложенной модели-врезке Юго-Западного Крыма (Альминской модели), как репрезентативной части Крымского полуострова в пределах гидрогеологической структуры II порядка [10]. Речной сток наиболее изучен в рамках модели-врезки, что позволило, используя модуль Streamflow-Routing Package, калибровать модель также

по расходам рек, на которых организовано 11 режимных створов. Кроме того, в границах Альминской модели расположена 101 наблюдательная скважина. При выборе калибруемых параметров возникает известная методическая проблема — нежелательно одновременно калибровать фильтрационные параметры и величину

питания. Наличие в качестве наблюдений расходов рек позволяет калибровать два типа параметров, но при этом необходимо выбрать более важные. Как указано выше, инфильтрационное питание на горных склонах и плато невозможно рассчитать методом геологического моделирования. При этом суммарное питание в этих

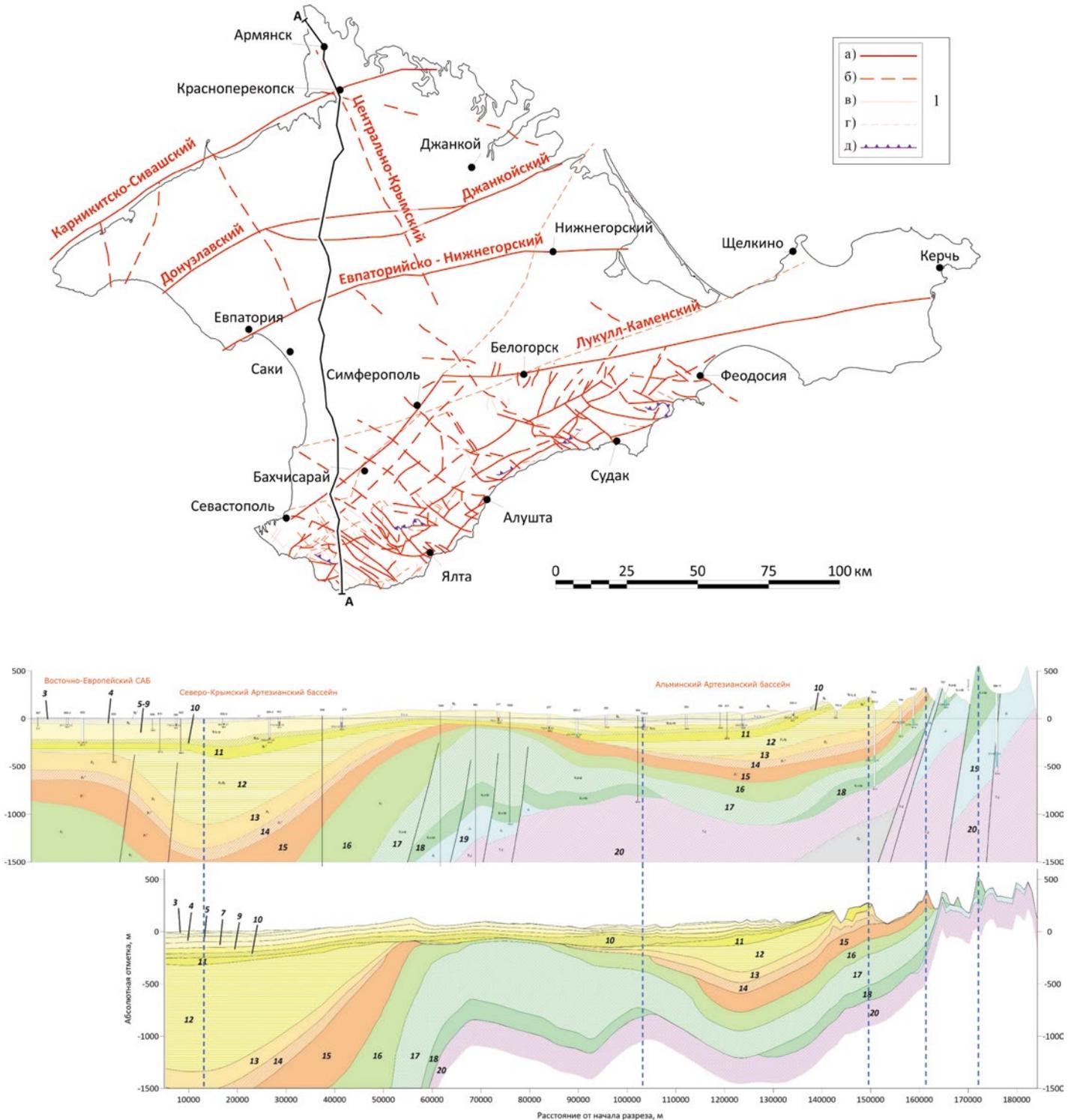


Рис. 1. Учетные в модели тектонические нарушения, модельный и геологический разрез к Государственной карте: 1 — разрывные нарушения: а) главные, б) главные предполагаемые, в) второстепенные, г) второстепенные предполагаемые, д) надвиги

зонах заведомо составляет не менее половины всего поступающего инфильтрационного питания. В то же время, фильтрационные параметры при организации водозаборов изучались на протяжении десятилетий, наиболее детально изучены значения проводимостей основных водоносных горизонтов и комплексов. Таким образом, приоритетными для калибрации являются величины питания в горной области (плато и склоны). Подчиненное значение имеют коэффициенты фильтрации относительно слабопроницаемых горизонтов. Значения проводимостей были обобщены по систематизированным фондовым данным о разведке подземных вод и запасов и не корректировались в ходе калибрации модели.

На остальной территории Крымского полуострова речной сток менее изучен, и на модели выполнена только верификация принятых значений параметров по известным уровням в наблюдательных скважинах. Полученные невязки приняты приемлемыми и не требуют корректировки принятых карт проводимостей по водоносным горизонтам и комплексам.

Стандартное отклонение невязок составило 10,2 м, средняя составила +2,14 м. Наибольшие невязки отмечаются в наблюдательных скважинах, расположенных в предгорьях.

Расходы рек воспроизведены [10] с удовлетворительной точностью, за исключением створа на р. Черная в с. Хмельницкое (отклонение — 57 %). Среднее отклонение расчетных расходов от фактических составляет 17 %.

После калибрации Альминской модели была выполнена верификация полученных модельных параметров на модели всего Крыма. Верификация выполнена также в стационарной постановке на условия 2020 г., где было использовано 220 наблюдательных скважин. Средняя невязка составила –0,36 м, стандартное отклонение по всем наблюдательным скважинам — 15,25 м. Наибольшие невязки получены для скважин, расположенных вблизи Крымских гор, при этом базовый масштаб модели не позволяет с необходимой детальностью рассчитать положение уровней подземных вод на куэстах, что, с учетом назначения модели, считается приемлемым.

Суммарно инфильтрационное питание подземных вод для Крымского полуострова, по результатам калибрации, составляет 1 090,9 тыс. м³/сут.

Оценка современного качества подземных вод Крымского полуострова по 302 химико-аналитическим исследованиям на 47 показателях позволила выделить участки с качеством, соответствующим предъявляемым требованиям, и потенциально перспективные для подсчета прогнозных эксплуатационных ресурсов подземных вод.

В современных условиях естественные ресурсы подземных вод, формирующиеся за счет инфильтрационного питания на территории полуострова (около 1 090 тыс. м³/сут), меньше общей балансовой величины запасов по всем категориям, составляющей 1 180,6 тыс. м³/сут. Такое соотношение ресурсов и запасов подземных вод противоречит концепции устойчивого водопользования. Для выяснения причин этого противоречия, учитывая то, что большая

часть запасов была оценена в период функционирования оросительных систем, связанных с водоподачей по СКК, было выполнено эпигнозное моделирование, в котором дополнительно к оцененному инфильтрационному питанию было задано ирригационное питание на орошаемых территориях, испарение грунтовых вод при близком их залегании и фильтрационные потери из СКК и системы магистральных каналов. Результаты этого моделирования подтвердили, что за счет дополнительных источников поступления воды суммарные ресурсы подземных вод на период действия СКК действительно превышали эксплуатационные запасы. Таким образом, оцененные на тот период эксплуатационные запасы могли использоваться без возникновения истощения подземных вод и угрозы интрузий морских вод.

Оценка ресурсного потенциала подземных вод выполнена при оцененных естественных ресурсах подземных вод, отвечающих современным условиям формирования питания, сложившемуся водоотбору, выявленным вододефицитным участкам и ограничениям, накладываемым гидрохимическими условиями основных эксплуатируемых водоносных горизонтов.

При расчете дефицита подземных вод в системе централизованного водоснабжения за основу взят фактический водоотбор, сложившийся к 2022 г. и объективно учитывающий потребности недропользователей в условиях отсутствия поступления днепровской воды по СКК. При оценке территориального распределения дефицита выполнен анализ распределения фактической добычи подземных вод комплексом централизованного водоснабжения по месту эксплуатации и по месту потребления, подтвердивший сложившуюся на территории полуострова Крым систему передачи добываемых подземных вод от участков добычи к районам потребления. Удовлетворение перспективной потребности в подземных водах централизованных систем водоснабжения предложено за счет:

— достигнутого объема эксплуатации подземных вод в 2021–2022 гг. (суммарно по Республике Крым 510,934 тыс. м³/сут), из которых 340,829 тыс. м³/сут — системами централизованного водоснабжения, соответственно по полуострову Крым в целом — 569,692 тыс. м³/сут, из которых 387,962 тыс. м³/сут — системами централизованного водоснабжения;

— покрытия общего дефицита за счет ресурсного потенциала в общем объеме по полуострову Крым в целом 46,2 тыс. м³/сут.

Распределение общего дефицита удовлетворения перспективной потребности систем централизованного водоснабжения Республики Крым по объектам административно территориального деления показывает (рис. 2), что максимальный дефицит наблюдается в Первомайском и Сакском районах. Территориальное распределение дефицита выполнено для 366 объектов административно территориального деления (полигонов), для каждого из которых рассчитана потребность в подземных водах. Недостаток воды по системам централизованного водоснабжения зафиксирован для 141 объекта.

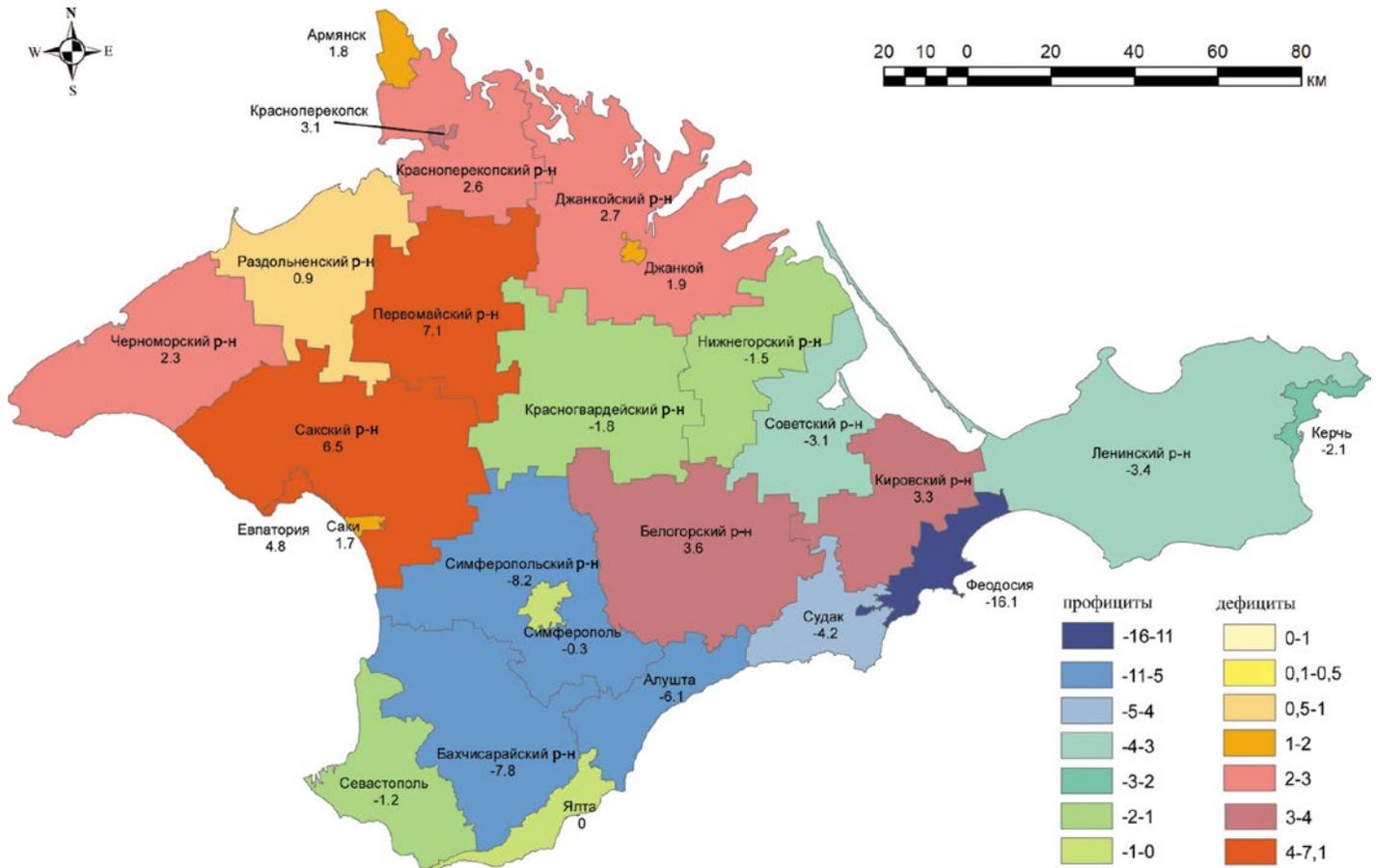


Рис. 2. Дефицит подземных вод в удовлетворении перспективной потребности систем централизованного водоснабжения по административным районам Крымского полуострова

В первую очередь рассматривается возможность покрытия дефицита в пределах каждого района. При этом определяющей является возможность отбора воды надлежащего качества, позволяющего использовать ее без дорогостоящей водоподготовки. Основным критерием является общая минерализация. Как потенциально пригодные для организации водоснабжения рассматриваются воды с минерализацией не выше 1,5 г/л. Дополнительно выделены четыре категории по жесткости и содержанию нормируемых отдельных макро- и микрокомпонентов. Категории 3 и 4 принимаются непригодными для добычи ввиду того, что для них требуется дорогостоящая водоподготовка. По изолиниям минерализации выделены области допустимого водоотбора в: среднесармат-понтическом водоносном комплексе и входящих в его состав горизонтах (слои № 5–9 по общей нумерации), среднемиоценовом (№ 11), нижнепалеоценовом (№ 15) и верхнеюрском (№ 19) горизонтах. В верхнеплиоценовом (№ 3), эоценовом (№ 13), верхнемеловом (№ 16) и валанжин-барремском (№ 18) водоносных горизонтах области, пригодные для организации водозабора, не обнаружены.

На рис. 3 показаны участки поиска по всем перечисленным водоносным горизонтам. В районах, рас-

положенных на южном берегу Крыма, предполагается покрытие дефицита за счет аллювиального водоносного горизонта. Для этих областей существует принципиальная возможность организации водозабора подземных вод для покрытия дефицита воды «на месте». Они отмечены красными точками, положение которых либо соответствует геометрическому центру района, либо смещено к ближайшему перспективному участку поиска.

Оценка ресурсного потенциала подземных вод проведена серией оптимизационных модельных расчетов на разработанной гидрогеодинамической модели. Его величина заведомо ограничена — при том, что фактический водоотбор составляет ~54 % естественных ресурсов, уже существует приток морской воды (таблица), который будет увеличиваться при любом повышении водоотбора. Существование притока морской воды подтверждается, например, сформированной интрузией морской воды на Орловском водозаборе. Оценка ресурсного потенциала подземных вод выполнена в два этапа. На первом этапе для модели задается дополнительный водоотбор на выявленных вододефицитных участках. Поскольку в первую очередь оценивается баланс подземных вод, водоотбор задается без привязки к существующим скважинам, в геометрические центры тех административно

Баланс подземных вод Крыма при различном водоотборе

Статья баланса	Фактический водоотбор 2021 год	Оценка части ресурсного потенциала подземных вод					
		Прогнозное покрытие дефицита		Дополнительный перехват родникового стока		Дополнительный водоотбор	
Приток, тыс. м ³ /сут							
	расход	расход	изменение	расход	изменение	расход	изменение
Реки	0,8	0,8	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0
Море	10,0	17,7	7,7	19,0	9,0	24,0	14,0
Питание	1090,9	1090,9	0,0	1090,9	0,0	1090,9	0,0
Северная граница	17,5	27,0	9,5	28,3	10,8	32,6	15,1
Отток, тыс. м ³ /сут							
Скважины	589,2	635,4	46,2	675,4	86,2	693,9	106,2
Родники	246,8	237,9	-8,9	216,8	-30,0	214,8	-32,0
Реки	130,8	126,6	-4,2	113,8	-17,0	112,8	-18,0
Море	152,4	136,5	-15,9	133,0	-19,4	126,8	-25,6

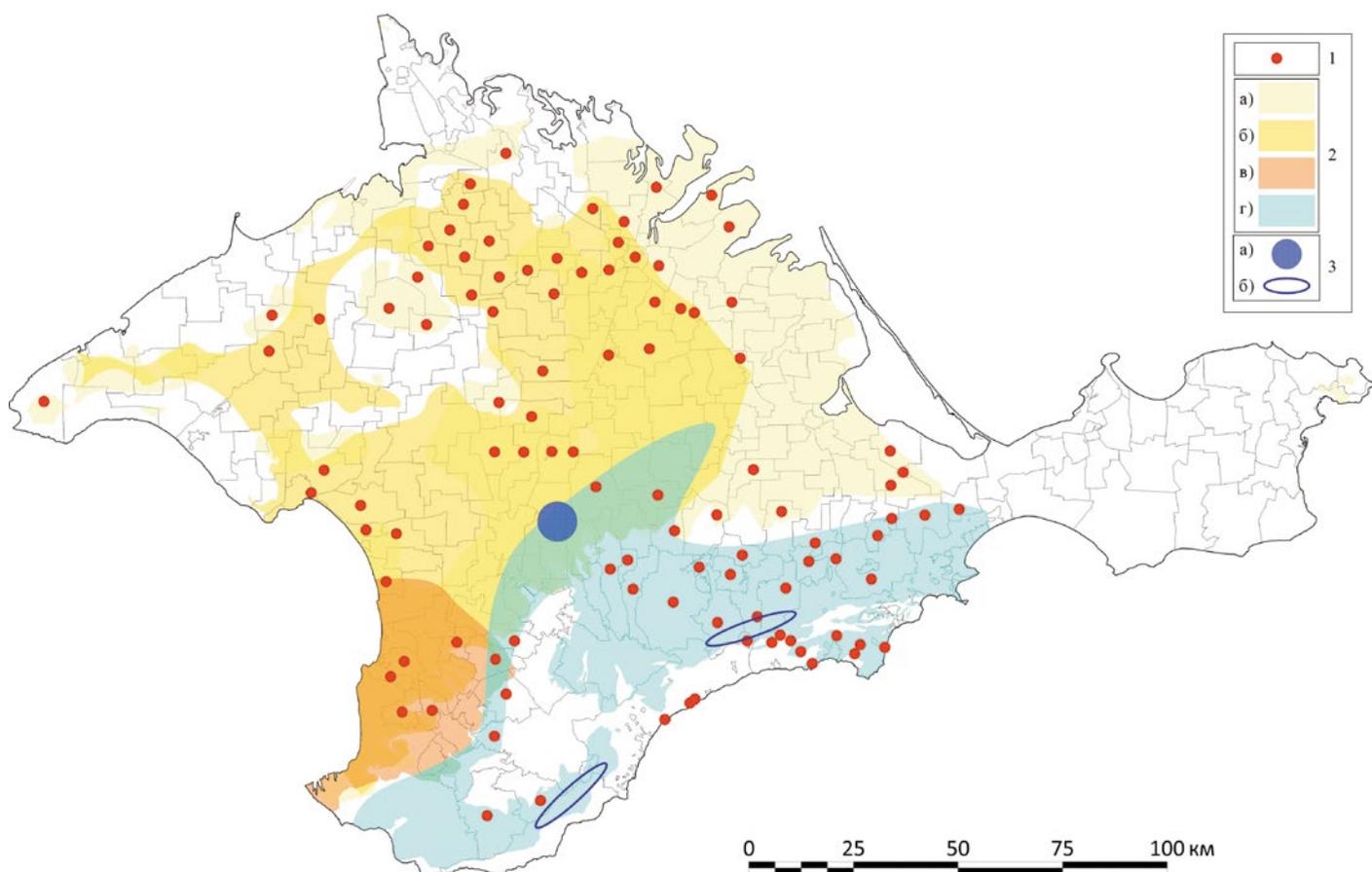


Рис. 3. Схема областей, перспективных для организации водозаборов: 1 — центральные точки административных районов с дефицитом водоснабжения и возможностью его покрытия; 2 — области, в которых качество воды пригодно для питьевого водоснабжения по гидрогеологическим подразделениям: а) среднесармат-понтический водоносный комплекс, б) среднемиоценовый водоносный горизонт, в) нижнепалеоценовый водоносный горизонт, г) верхнеюрский водоносный горизонт; 3 — перспективные участки: а) для организации водозабора подземных вод (участок № 1), б) для перехвата родникового стока (участок № 2)

территориальных единиц, в которых существует дефицит удовлетворения перспективной потребности систем централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения и, в то же время, качество подземных вод хотя бы в одном водоносном горизонте соответствует предъявляемым требованиям. Общая величина покрываемого дефицита составила 46 219 м³/сут. Дополнительный водоотбор в каждой точке задан для самого верхнего водоносного горизонта с приемлемым качеством воды.

На втором этапе рассматривается возможность организации дополнительного водоотбора без привязки к вододефицитным районам. Поскольку в горах формируется высокая родниковая разгрузка — 246,6 тыс. м³/сут на 2021 г., для оценки части ресурсного потенциала перспективными являются области максимальной ее интенсивности: центральная часть Крыма, между Симферополем и Белогорском и Крымские горы в области выхода верхнеюрского горизонта на поверхность. По-видимому, перенаправление части этой разгрузки на водопотребление незначительно повлияет на прочие водозаборы, так, на 2021 г. частично зафиксировано 125 каптированных

родников с общим расходом 11 175 м³/сут. Ввиду высокой скорости водообмена в закарстованных верхнеюрских известняках, водоносный горизонт уязвим к поверхностным загрязнениям, но в то же время за счет высокой скорости водообмена и близости к области питания вода имеет низкую минерализацию, что подтверждается многочисленными пробами. Таким образом, область выхода на поверхность верхнеюрского водоносного горизонта является перспективным участком № 1 (рис. 3).

Между Симферополем и Белогорском расположена область питания эксплуатируемых водоносных горизонтов (рис. 3), связанная с их выходом на поверхность (участок № 2). Организация здесь нового водозабора повлияет на все участки, расположенные ниже по потоку подземных вод. Однако за счет расположения на границе между Альминским и Индольским артезианскими бассейнами это влияние распределится по большей площади, и воздействие на любой отдельно взятый существующий водозабор будет приемлемым. Допустимая величина дополнительного водоотбора оценивалась путем решения серии прогнозных задач в стационарной

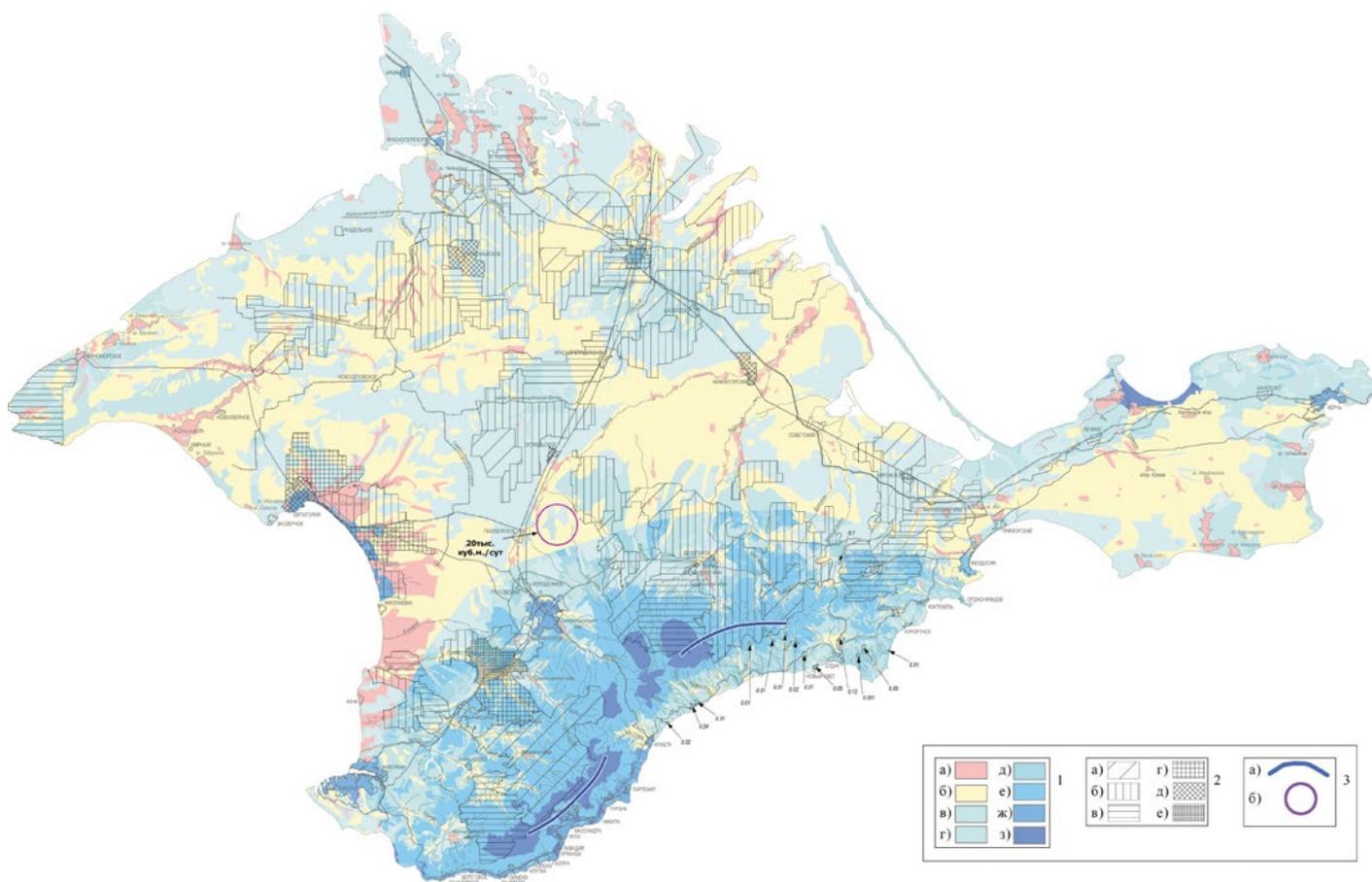


Рис. 4. Карта ресурсного потенциала Крымского полуострова: 1 — инфильтрационное питание: а) нет питания, б) до 5 мм/год, в) до 10 мм/год, г) до 20 мм/год, д) до 30 мм/год, е) до 50 мм/год, ж) до 100 мм/год, з) свыше 100 мм/год; 2 — возможность покрытия дефицита по административным районам: а) до 0,1 тыс. м³/сут, б) до 0,5 тыс. м³/сут, в) до 1 тыс. м³/сут, г) до 2 тыс. м³/сут, д) до 2,5 тыс. м³/сут, е) выше 2,5 тыс. м³/сут, объекты вне масштаба карты показаны стрелками со значениями в м³/сут; 3 — перспективные участки: а) участки, перспективные для перехвата родникового стока, б) область, перспективная для отбора подземных вод

постановке. Он повышался с шагом в 5 000 м³/сут, распределенным по площади на выбранных участках. После каждого увеличения водоотбора анализировалось изменение общего баланса модели и повышение ожидаемого притока морской воды.

В результате оптимизационных расчетов выяснилось, что кроме фактически отбираемых сегодня 589,2 тыс. м³/сут, можно в рамках устойчивого водопользования (исключения формирования новых интрузий морских вод) отбирать еще 106,2 тыс. м³/сут. дополнительно (таблица, рис. 4).

Таким образом, результаты проведенной оценки показывают, что «извлекаемая» часть ресурсного потенциала или прогнозные эксплуатационные запасы подземных вод, с учетом сложившейся водохозяйственной обстановки, составляют около 64 % естественных ресурсов подземных вод, что, по-видимому, близко к верхней границе ресурсного потенциала Крымского полуострова при отсутствии переброски стока с материка через СКК. Очевидно, что использовать 100 % естественных ресурсов подземных вод невозможно — требуется сохранение части их естественного потока, который обеспечивает динамическое равновесие подземных вод с морскими. При полной инверсии разгрузки естественного потока подземных вод в море неизбежно произойдет их замещение морской водой на существенной части береговой линии, что в дальнейшем будет угрожать интенсивным формированием интрузий морских вод. В существующих условиях эксплуатации подземных вод приток морской воды оценивается в 1,5 % от их общего водоотбора. Скорее всего, за счет смешения с подземными водами такое соотношение не критично ухудшает качество отбираемой воды. Однако любое дальнейшее повышение водоотбора увеличивает привлечение воды из моря. Так, в предложенном сценарии максимального перспективного водоотбора (+106,2 тыс. м³/сут) ее приток составляет уже 3,5 % от общего водоотбора подземных вод.

Увеличение отбора подземных вод выше 690–700 тыс. м³/сут, несмотря на его обеспеченность естественными ресурсами полуострова Крым, может привести к ряду неблагоприятных экологических последствий:

— сокращение меженного стока рек полуострова за счет сокращения разгрузки подземных вод в их верховьях и увеличения фильтрационных потерь в области влияния водозаборов в нижнем течении;

— увеличение минерализации отбираемой воды за счет морских интрузий в прибрежных частях на севере и юго-западе полуострова;

— увеличение минерализации воды водозаборов в степной части Крыма за счет подтягивания контуров засоленных вод.

Таким образом, любые оценки, связанные с расширением существующих или созданием новых водозаборов, должны выполняться с учетом полученных результатов и с использованием региональной модели. Дальнейшее увеличение перспективного водоотбора (и, соответственно, повышение оценок ресурсного потенциала)

слишком рискованно, и возможно только при выполнении частных исследований по всем находящимся под угрозой водозаборам с выполнением гидрохимического опробования эксплуатируемых водоносных горизонтов и применением геомиграционного моделирования, в том числе с учетом плотностной конвекции, что требует постановки дополнительных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровский, Б.В. Результаты оценки ресурсного потенциала пресных подземных вод на территории Российской Федерации / Б.В. Боровский, В.Ю. Абрамов, А.Ю. Вавичкин, Т.В. Гараева, Т.Н. Зубанова, О.А. Олиферова, С.С. Палкин, С.В. Палкин, А.М. Просеков, В.С. Селезнев, Г.А. Скворцова, Л.Б. Сычева, Г.В. Устинова, Т.П. Хачиян, Т.И. Шарова, А.Л. Язвин, В.В. Куренной, С.Л. Пугач // Матер. междунар. н.-прак. конф., часть 2. — Московская область, п. Зеленый.: ФГУП «ВСЕГИНГЕО», 2011. — С. 39–49.
2. Гриневский, С.О. Принципы региональной оценки инфильтрационного питания подземных вод на основе геогидрологических моделей / С.О. Гриневский, С.П. Поздняков // Водные ресурсы. — 2010. — Т. 37. — № 5. — С. 543–557.
3. Информационный бюллетень о состоянии недр территории Южного федерального округа Российской Федерации за 2022 год. — Выпуск 18. — Ессентуки: ФГБУ «Гидроспецгеология», Южный региональный центр ГМСН. — 2023. — 327 с.
4. Кац, Я.Г. Структурно-геоморфологический анализ Крыма по дешифрированию космоснимков / Я.Г. Кац, Н.В. Макарова, В.В. Козлов, Д.М. Трофимов // Изв. вузов. Геол. и разведка. — 1981. — № 3. — С. 8–20.
5. Макарова, Н.В. Новейшая тектоника Равнинного Крыма в связи с проблемами его водоснабжения / Н.В. Макарова, В.М. Макеев, И.В. Галицкая, Т.В. Суханова // Бюл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд. геол. — 2018. — Т. 93. — Вып. 3. — С. 3–11.
6. Поздняков, С.П. Моделирование родникового стока в трещинно-карстовом массиве в условиях климатических изменений / С.П. Поздняков, В.А. Бакшевская, И.А. Чиганов // Инж. геология. — 2023. — Т. XVIII. — № 2. — С. 30–42.
7. Приблуда, В.Д. Баланс подземных вод юго-западной части Горного Крыма / В.Д. Приблуда, А.А. Коджаспиров, В.Н. Дублянский // Геологический журнал. — 1979. — Т. 39. — № 2. — С. 38–46.
8. Шестаков, В.М. Геогидрология / В.М. Шестаков, С.П. Поздняков. — М.: Академкнига, 2003. — 173 с.
9. Langevin, C.D. Documentation for the MODFLOW 6 Groundwater Flow Model / C.D. Langevin, J. D. Hughes, E.R. Banta, R.G. Niswonger, Sorab. Panday, and A.M. Provost: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, 2017, book 6, chap. A55, 197 p., <https://doi.org/10.3133/tm6A55>.
10. Samartsev, V.N. Assessing the Effect of Climate Change in the 21st Century on Groundwater Balance in the Southwestern Crimea / V.N. Samartsev, I. A. Chiganov, S. O. Grinevskii et al. // *Water Resour* **51**, 938–950 (2024). <https://doi.org/10.1134/S0097807824701227>.
11. Winston, R.B. 2022, ModelMuse version 5.1.1: U.S. Geological Survey Software Release, 15 November 2022 / R.B. Winston, <https://doi.org/10.5066/P90QQ94D>.

© Коллектив авторов, 2025

Маслов Алексей Анатольевич // maa20070@yandex.ru
Самарцев Всеволод Николаевич // SamartsevVN@my.msu.ru
Гриневский Сергей Олегович // sogrinev@mail.ru
Преображенская Александра Евгеньевна // shur_gmur22@mail.ru
Лехов Владимир Алексеевич // v.lekhov@gmail.com
Филимонова Елена Александровна // ea.filimonova@yandex.ru
Барановская Екатерина Ивановна // baranovskaya_kat@mail.ru
Глухова Светлана Алексеевна // koval.sa95@yandex.ru
Харитоновна Наталья Александровна // tchenat@mail.ru
Поздняков Сергей Павлович // sppozd@mail.ru

Статья поступила в редакцию 22.01.2025 г.