

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ НАРАЩИВАНИЯ РЕКРЕАЦИОННОГО, ПРЕСНОВОДНОГО И БИОЛО- ГИЧЕСКОГО РЕСУРСНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ МЕЛКОВОДНЫХ ЗАЛИВОВ, ЛИМАНОВ И БУХТ

УДК 556.332.012:(551.444:556.168) (477.75)+(262.5)

В.М.Шестопалов*, В.А.Иванов, А.С.Богуславский***,
С.И.Казаков***, А.С.Кузнецов*****

**Научно-инженерный центр радиогидрогеоэкологических
полигонных исследований, НАН Украины, г.Киев;*

***Морской гидрофизический институт, г.Севастополь*

****Экспериментальное отделение*

Морского гидрофизического института, пгт.Кацивели

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДООБМЕНА ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГОРНОГО КРЫМА С АКВАТОРИЕЙ ЧЕРНОГО МОРЯ И ОЦЕНКА УЯЗВИМОСТИ КАРСТОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Рассматриваются условия формирования, пути движения и уязвимость к загрязнению карстовых подземных вод юго-западной части горного Крыма. С помощью трехмерной гидрогеологической модели изучены зоны быстрой фильтрации и возможной субмариной разгрузки подземных вод с плато Ай-Петри через береговую зону на примере территории детальных исследований в районе пгт.Кацивели. Разработан модельный метод и выполнена предварительная оценка уязвимости подземных вод карстового формирования исследуемой территории.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *подземные воды, горный Крым, карст, уязвимость, защищенность подземных вод, водообмен, моделирование.*

Проблемы исследования водообмена гидрогеологической системы горного Крыма и оценки ресурсов и уязвимости карстовых подземных вод имеют важное научное и практическое значение как с точки зрения перспектив улучшения водоснабжения региона, так и с точки зрения развития рекреационной инфраструктуры в предгорных районах и прибрежной зоне.

Подземные воды карстового формирования известняковых плато горного Крыма являются компонентой геологической среды, которая наиболее чувствительна к антропогенным и техногенным загрязнителям, в частности, к атмосферным осадкам, загрязненным тяжелыми металлами, радионуклидами или другими загрязнителями, представляющими непосредственную угрозу для карстовых подземных вод.

В отличие от подземных вод платформенных гидрогеологических систем, подземные воды известняковых плато горного Крыма имеют трещинно-карстовый механизм формирования, для которого характерна высокая степень взаимосвязи подземных вод с водами поверхностного стока, временных водотоков и непосредственно атмосферных осадков. Поток подземных вод (подземный сток) этих территорий отличается струйным характером.

© В.М.Шестопалов, В.А.Иванов, А.С.Богуславский, С.И.Казаков,
А.С.Кузнецов, 2014

ром и непостоянством во времени, а геологическая среда – высокой степенью неоднородности по проницаемости в плане и в разрезе. Все это определяет значительную сложность моделирования и оценки ресурсов подземных вод исследуемой территории, а также оценки их уязвимости и защищенности к возможному загрязнению.

В настоящей работе приведены результаты исследований, проведенных ЭО МГИ и НИЦ РПИ НАНУ в 2011 – 2014 гг. в ходе продолжения работ, выполнявшихся на предыдущих этапах в 2007 – 2010 гг. [1 – 4].

Целью работы является изучение особенностей движения карстовых подземных вод Горного Крыма от области их формирования на плато яйлы через предгорную и береговую зоны с помощью гидрогеологического моделирования, а также предварительная оценка их уязвимости к консервативному загрязнителю.

На предыдущих этапах исследований была разработана региональная гидрогеологическая модель территории юго-западной части Горного Крыма, включая береговую зону, с общей площадью 1500 км² и дискретностью регулярной сетки 500 × 500 м. С помощью этой модели была получена приближенная оценка естественных ресурсов подземных вод исследуемой области в 471 тыс. м³/сут и определены основные направления потоков подземных вод, в том числе вдоль предполагаемых транзитных зон быстрой фильтрации через береговую зону Южного берега Крыма к предполагаемым участкам субмаринной разгрузки [1,2].

На настоящем этапе работ указанные результаты были уточнены и детализированы в соответствии с полученными данными исследований геолого-гидрогеологических и инженерно-геологических условий Кацивельского участка [3, 4]. В результате была разработана более детальная гидрогеологическая модель-врезка этого участка площадью 80 км² и дискретностью сетки 100 × 100 м. Эта модель позволила более рельефно (по сравнению с региональной моделью) воспроизвести субмеридиональные зоны быстрого транзита подземных вод от области питания на плато яйлы через береговую зону к участкам субмаринной разгрузки.

С помощью транспортного блока модели Кацивельского участка на основе разработанной нами методики выполнена предварительная модельная оценка уязвимости карстовых подземных вод по отношению к условному консервативному загрязнителю, движущемуся со скоростью потока подземных вод.

Как региональная модель, так и модель-врезка разработаны с использованием системы моделирования подземных вод Чанга и Кинзелбаха "Processing Modflow" [5], в котором для решения фильтрационной задачи (фильтрационный блок модели) использовался код MODFLOW, разработанный Макдональдом и Хабраугом [6], а для моделирования транспорта загрязнителя – код MT3DMS, разработанный Женгом и Вангом [7].

Математически фильтрационный блок модели представляет собой решение начально-краевой задачи для дифференциального уравнения трехмерной фильтрации подземных вод в исследуемой области:

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

где K_x, K_y, K_z – коэффициенты фильтрации вдоль координатных осей x, y и z соответственно, м/сут; $H(x, y, z)$ – уровень (напор) подземных вод, м; $W(x, y, z)$ – удельная функция источников-стоков, 1/сут; μ – удельная емкость (водоотдача) пород, 1/м; t – время, сут.

Транспортный блок модели в нашем случае реализует численное решение краевой задачи для дифференциального уравнения массопереноса загрязнителя в пространственно неоднородной геологической среде:

$$n \frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x_i} (v_i C) + q_s C_s, \quad (2)$$

где C – концентрация загрязнителя, растворенного в подземных водах, (ед. массы)/м³; t – время, сут; x_i – расстояние по соответствующей координате, м; v_i – скорость фильтрации, м/сут; q_s – расход вод на единицу объема водоносного горизонта, сут⁻¹; C_s – концентрация источников или стоков, (ед. массы)/м³; n – эффективная пористость. Транспортное уравнение (2) связано с уравнением потока (1) соотношением:

$$v_i = - \frac{K_{ii}}{n} \frac{\partial H}{\partial x_i}, \quad (3)$$

где K_{ii} – компоненты тензора коэффициента фильтрации, м/сут; H – гидравлический напор, получаемый в результате решения уравнения потока подземных вод (1), м.

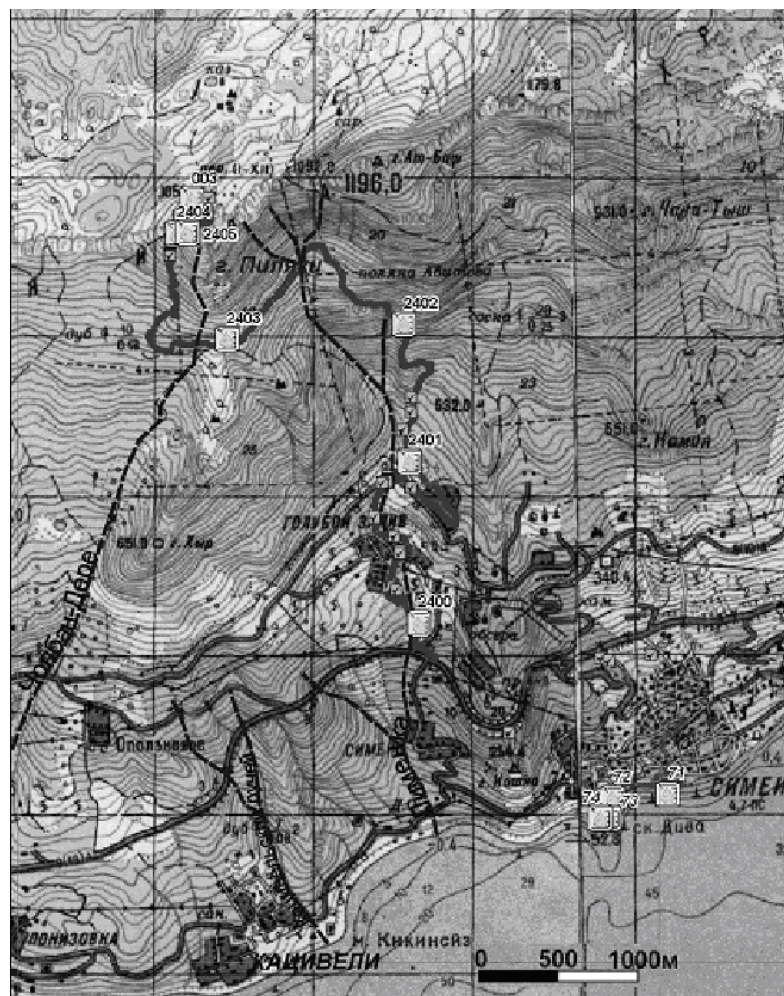
Поскольку региональная модель была достаточно охарактеризована в [1, 2], ниже рассмотрены более детально результаты, полученные на модели-врезке Кацивельского участка.

Характеристика моделируемой территории. В качестве участка детальных исследований (модели-врезки) выбрана часть территории Южного берега Крыма в районе м.Кикинеиз и Лименской бухты (25 км к западу от г.Ялта). Территория участка включает пгт.Кацивели и прилегающие районы с севера (участок Главной гряды Крымских гор, до 9 км от береговой линии), востока и запада (по береговой линии пгт.Понизовка – пгт.Симеиз). Участок отличается высокой интенсивностью проявлений опасных геологических процессов (оползней, селей, обвалов), наличием зон субмеридиональной разгрузки карстовых вод вдоль трасс оползневых массивов (г.Кошка, г.Биюк Исар). Схема участка на основе карты масштаба 1:100000 с указанием маршрута и точек выполненного опробования подземных вод (минерализация) в родниках приведена на рис.1.

Соответствующий участок Ай-Петринской яйлы характеризуется максимально активными проявлениями карста, а южные его склоны – разломными нарушениями, отразившимися на характере рельефа и гидрогеологических особенностях территории.

Отличительной особенностью территории являются вулканические массивы Лименской группы – г.Пиляки и г.Хыр (рис.1). С востока и запада к вулканогенным массивам Лименской группы примыкают соответственно древние оползневые массивы-отторженцы юрских известняков Главной гряды – г.Биюк Исар и Кошка, формирующие вдоль своих трасс потенциальные зоны субмеридиональной разгрузки карстовых вод с плато яйлы.

Характерным для территории является наличие водораздельных гребней



Точки отбора проб воды из источников и водотоков

Р и с . 1 . Схема территории участка детальных исследований.

субмеридионального направления, разделенных долинами р.Лименка на востоке, Чолбан-дере на западе и Кацивельского ручья в центре. Долины рек соответствуют разломным зонам, окаймляющим с запада и востока вулканический массив Пилыки-Хыр. Водосборная площадь этих рек достигает 15 км². Кацивельский ручей (водосборная площадь 5 км²) берет начало на южном склоне г.Хыр (абс. отметки 400 – 500 м) и питается за счет атмосферных осадков и локальной разгрузки подземных вод. По долинам водотоков в 1983 и 1993 г.г. наблюдались мощные селевые паводки. На склонах долин развиты многочисленные активные оползни.

Согласно нашим предположениям, более мощные потоки разгрузки подземных вод карстового формирования с плато яйл Ай-Петринского массива в пределах исследуемой территории могут ассоциироваться с разломными зонами по границам вулканогенного комплекса (рис.1) в направлении долины р.Чолбан-Дере, а также по трассам оползней древних известняко-

вых массивов-отторженцев г.Кошка и Биюк Исар.

Подтверждением этой гипотезы являются результаты опробования подземных вод в местах выхода родников. По данным работы С.Н.Михайловского и В.Ф.Пчелинцева [8], именно в этих зонах расположены сравнительно высокодебитные источники (0,1 – 2 л/с) чистой питьевой воды (минерализация не более 0,2 – 0,5 г/л). В работе описано более 50 таких источников в районе пос.Оползневое, пос.Парковое (источники Сара, Яман-дере, Суук-Су, и др.), и выше по долине р.Чолбан-Дере и в районе г.Биюк Исар (источники Ялых-Лар, Анзилия, Чахыл-Чокрак, и др.), а также вдоль трассы хребта г.Кошка (источники с.Голубой Залив).

Согласно результатам проведенных нами опробований в районе оползневой массива г.Кошка (рис.3) присутствует большое количество родников с низкими и средними дебитами (до 1 л/с) карстово-трещинных вод с минерализацией, не превышающей 0,35 г/л и температурой воды 10,5 – 11 °С.

Существование мощной разгрузки карстовых подземных вод по трещиноватым породам г.Кошка подтверждается также наличием куста артезианских скважин с общим дебитом 600 м³/сут севернее ПМК (высота 400 м над уровнем моря).

Описание модели и результаты моделирования. Рассмотренные выше данные изучения геологических и гидрогеологических условий исследуемого участка использованы для создания гидрогеологической модели-врезки участка, которая позволит усовершенствовать гидрогеологическую модель юго-западной части Горного Крыма, разработанную на предшествующем этапе работ.

Исследуемая территория участка дискретизована на квадратной конечно-разностной сетке с размерами блоков 100 × 100 м. Модель включает два горизонта в вертикальном сечении, каждый из которых аппроксимирован на сетке размером 87 × 92 блока. Таким образом, территория модели составляет 80,04 км² (размеры моделируемого участка 8,7 км с запада на восток и 9,2 км с севера на юг).

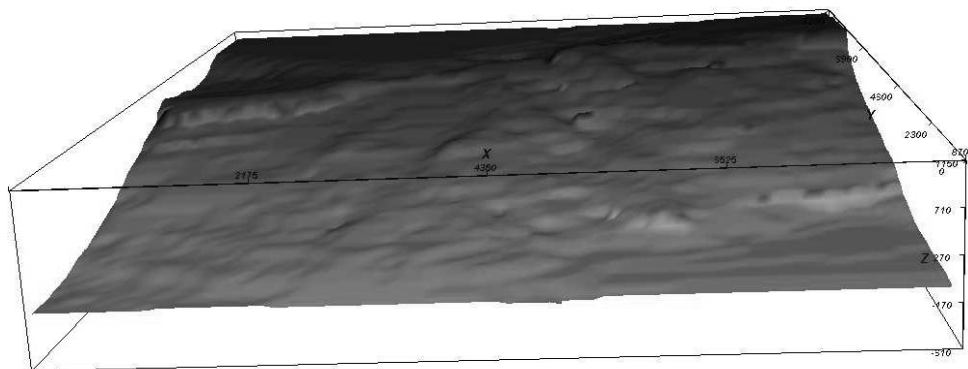
Южная оконечность моделируемой области заходит под акваторию моря на расстояние 400 – 1500 м, что позволяет воспроизводить на модели локальные зоны субмариной разгрузки.

Задание гидрогеологических параметров модели – коэффициентов фильтрации и инфильтрационного питания, выполнялось в соответствии с рассмотренными выше геолого-гидрогеологическими особенностями участка и предположениями о расположении зон быстрого транзита подземных вод.

Для более точного воспроизведения вертикальной топологии (мощности, отметок кровель и подошв) модельных горизонтов была сформирована цифровая модель рельефа территории, показанная на рис.2.

Разработка модели включала:

- задание зон аномально высокого питания в пределах карстового плато Ай-Петри, связанных с повышенной плотностью карстовых форм (воронок, пещер) по данным дешифрирования космоснимков и карстологическим данным;
- учет линейных зон повышенной проводимости, связанных с тектоническими разломами;
- задание субмеридиональных зон повышенной проводимости через скло-



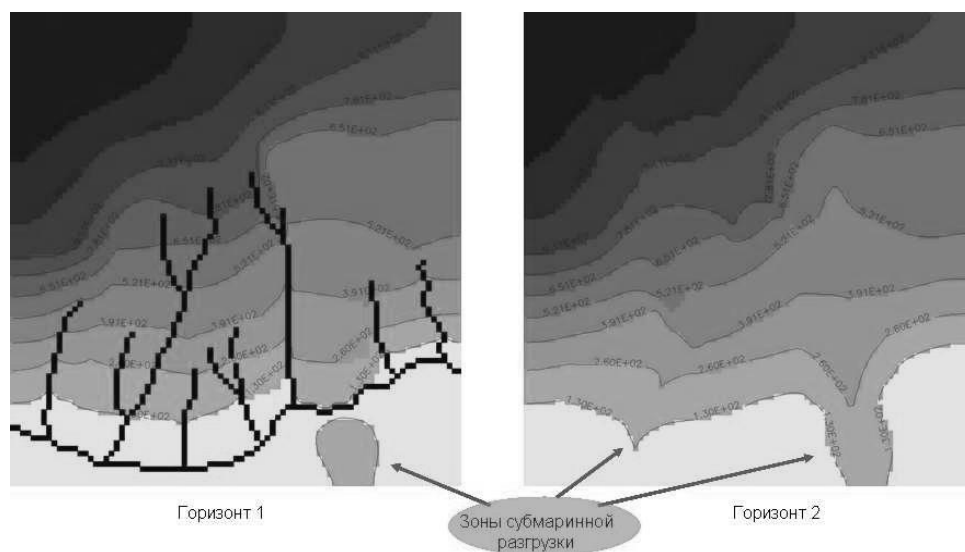
Р и с . 2 . Цифровая модель рельефа, заданная на модели.

новую и береговую зоны вдоль трасс древних оползней (г.Кошка, Исарская группа, Кацивельский оползень) и тектонических разломов по границам вулканогенного массива Лименской вулканической группы (г.Пиляки-Хыр).

Основной задачей калибровки было воспроизведение на модели субмеридиональных зон быстрого транзита подземных вод карстового формирования через береговую зону. Как уже отмечено выше, они ассоциируются с зонами повышенной проводимости на границах вулканогенного массива (г.Пиляки-Хыр) и вдоль трасс древних оползней (г.Исар и Кошка).

В результате решения обратной стационарной задачи (подбора вертикальных и горизонтальных коэффициентов фильтрации) получены распределения напоров подземных вод, удовлетворяющие этим предположениям (рис.3).

На рисунке видны локальные зоны повышенного напора подземных вод на траверзе г.Кошка и ущелья Чолбан-Дере, соответствующие предполагаемым участкам субмаринной разгрузки подземных вод.



Р и с . 3 . Поле распределения напоров подземных вод модельных водоносных горизонтов, полученное в результате калибровки модели.

Таким образом, на модели удалось воспроизвести более интенсивный вертикальный нисходящий поток подземных вод из области их формирования на плато Ай-Петри вдоль предполагаемых зон быстрой фильтрации, соответствующих трассам древних оползней и тектоническим зонам вдоль границ вулканогенных массивов.

Оцененное суммарное питание подземных вод (естественные ресурсы участка) составило 50 тыс. м³/сут. Суммарный объем субмаринной разгрузки на модели составил 5600 м³/сут. Остальные 44400 м³/сут разгружаются в реки и родники.

На модели получены две зоны субмариной разгрузки, определяемые по характеру гидроизогипс на глубине до 200 м ниже уровня моря. Указанные зоны расположены на траверзе г.Кошка (более мощная зона) и западнее м.Кикинеиз.

Оценка защищенности и уязвимости подземных вод. Учитывая существующие в мире определения [9] и результаты наших исследований в указанном направлении [10,11], под термином «защищенность подземных вод» мы будем понимать комплексную барьерную функцию геологической среды, определяемую степенью развития физических и геохимических барьеров на пути загрязняющих веществ от их источника к оцениваемым подземным водам. К физическим барьерам относятся слои с низкой проницаемостью, отложения или фракции пород с высокой пористостью, дисперсией и т.п. К химическим барьерам можно отнести сорбцию, химические взаимодействия, приводящие к распаду или иммобилизации загрязнителя и т.п.

По отношению к источникам загрязнения на поверхности земли, защитная роль геологической среды покровных отложений может быть оценена по защитным свойствам *транзитной* или *покровной* толщи пород от поверхности земли до оцениваемого горизонта, куда инфильтруется загрязненная поверхностная вода.

Под термином «уязвимость подземных вод» будем понимать чувствительность подземных вод к загрязнению от источника загрязнения, которая определяется гидравлической и миграционной проницаемостью, связанной с отсутствием, слабостью или нарушенностью естественных физических и геохимических барьеров на пути рассматриваемого загрязнителя от источника к оцениваемым подземным водам (водоносному горизонту, водозабору и т.п.).

Как отмечает В.М.Шестаков [12], при решении любой гидрогеодинамической задачи обязательно следует ставить вопрос о возможных проявлениях влияния неоднородностей геологической среды, и изучение гидрогеодинамических процессов нельзя считать завершенным, если не проанализировано влияние на них неоднородности горных пород и массивов. Это заключение является особенно актуальным в вопросах оценки защищенности и уязвимости подземных вод.

Из применяемых в мире различных методов оценки защищенности и уязвимости подземных вод лишь немногие в той или иной степени учитывают зоны быстрой фильтрации и миграции (ЗБФМ) геологической среды. Такой учет отчасти имеется в существующих *индексно-рейтинговых* методах оценки уязвимости и защищенности подземных вод карстовых территорий. Достаточно полный обзор этих методов приведен Ф.Цвааленом в отчете

Проекта Европейской Комиссии Cost 620 [13], целью которого была разработка универсального индексно-рейтингового метода оценки защищенности карстовых территорий, основанного на современных ГИС-технологиях. Результатом этой работы было создание *COP*-метода, известного в литературе как "Европейский подход" к оценке уязвимости подземных вод карстовых территорий [14]. Уязвимость подземных вод оценивается произведением трех показателей: *C* (*flow Concentration*) – концентрация потока; *O* (*Overlying layers*) – покровные слои; *P* (*Precipitation regime*) – режим осадков.

На основе этого метода в НИЦ РПИ В.М.Шестопаловым, А.Б.Климчуком, С.В.Токаревым и Г.Н.Амеличевым для части изучаемой нами территории горного Крыма – Ай-Петринского плато был разработан модифицированный *COP* метод (Горно-крымский подход) [15]. Адаптация базового варианта *COP*-метода «Европейского подхода» в «Горно-крымском подходе» состояла во введении оценки эпикарстовой зоны в показатель покровных слоев "О", а также факторов концентрации стока в ненасыщенной зоне (ЗБФМ) в показатель "С" (карстовые воронки, поноры, пещеры, разломы). В результате была построена карта уязвимости карстовых подземных вод массива Ай-Петри, на которой выделены следующие классы (зоны) уязвимости: 1) очень высокая, 2) высокая, 3) средняя, 4) низкая и 5) очень низкая [15].

Достоинства «Горно-крымского подхода» состоят в детальности учета условий питания подземных вод и неоднородностей покровных отложений – эпикарста, карста (понор, пещер, шахт), тектонических нарушений. В то же время он имеет недостатки, типичные для индексно-рейтинговых методов, – субъективизм в выборе ключевых параметров районирования, условность рейтинговых шкал факторов и итоговой оценки уязвимости. Данный метод учитывает только вертикальное проникновение загрязнителя, поэтому зоны высокой и очень высокой уязвимости территории занимают относительно небольшие по площади участки, соответствующие зонам значительных проявлений неоднородности покровных отложений – карста, тектонических нарушений.

Исходя из общей целесообразности и перспективности *модельных методов* оценки уязвимости подземных вод, нами была выполнена предварительная модельная оценка уязвимости подземных вод рассматриваемой нами юго-западной части Горного Крыма.

Как показали результаты предыдущих этапов работ по созданию постоянно действующей гидрогеологической модели исследуемой территории [1 – 4], метод трехмерного моделирования с использованием системы моделирования подземных вод "*Processing Modflow*" [5 – 7] является в принципе достаточным для учета в геофильтрационной модели ЗБФМ карстовых территорий.

С целью выполнения предварительной оценки собственной уязвимости и защищенности подземных вод фильтрационная модель была дополнена транспортным блоком, как описано выше.

Основы применяемой нами методики оценки защищенности и уязвимости подземных вод с помощью моделирования были разработаны применительно к одномерной модели миграции радионуклидов чернобыльского происхождения с загрязненной поверхности [11].

Основная идея методики, которая остается справедливой и в нашем

случае трехмерного моделирования, состоит в следующем.

При оценке собственной (не зависящей от конкретного загрязнителя) защищенности или уязвимости подземных вод заранее неизвестно, какая будет концентрация загрязнителя на поверхности. Поэтому в модели определяется безразмерная относительная концентрация $c(x, y, z, t) = C(x, y, z, t)/C_0(x, y)$ по отношению к некоторому задаваемому начальному граничному значению. В качестве этого значения может быть принята концентрация в источнике загрязнения – на поверхности земли, поверхности уровня подземных вод и т.п. В нашем случае в качестве $C_0 = 1$ рассматривалась единичная концентрация условного консервативного растворимого загрязнителя в водах, поступающих на уровень верхнего водоносного горизонта с потоком инфильтрационного питания. При наших принятых предположениях и ограничениях (консервативный мигрант, адвективный механизм переноса), поле прогнозных концентраций на заданный момент времени определяется с помощью рассмотренного выше транспортного блока модели, описываемого уравнениями (2) – (3).

Прогнозное значение относительной концентрации на некоторое характерное время t^* на глубине z^* $c(z^*, t^*)$ характеризует *миграционную проницаемость* толщи покровных отложений, которая в свою очередь может служить мерой *покровной* уязвимости данного горизонта.

Обратная относительная концентрация

$$c^{-1}(z^*, t^*) = C_0/C(z^*, t^*), \quad (4)$$

может служить соответственно показателем *защитной способности* (потенциала) покровных отложений и мерой *покровной* защищенности данного горизонта. Для целей картирования более удобным показателем защищенности подземных вод является десятичный логарифм этой величины:

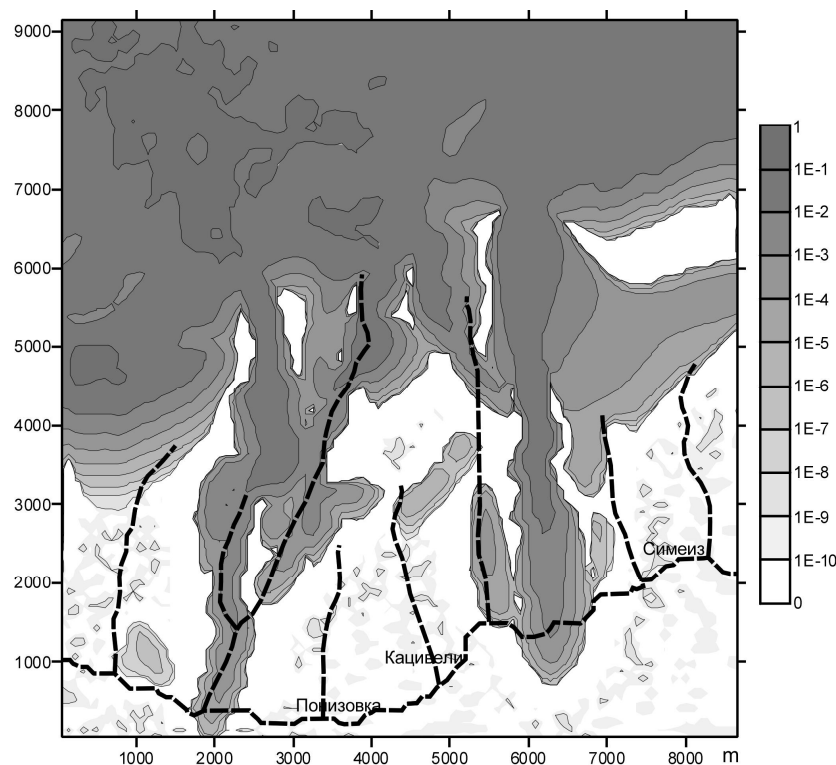
$$p = \log c^{-1}(z^*, t^*) = -\log c(z^*, t^*), \quad (5)$$

поскольку значения относительной концентрации $c(z, t)$, особенно для глубоких горизонтов, часто являются достаточно малыми.

Роль транспортного блока в оценке заключается в обеспечении численного решения начально-краевой задачи (1) – (3) на контрольный период прогноза t^* , который соответствует характерному времени водообмена в рассматриваемой гидрогеологической системе и определяется в ходе решения обратных задач. В нашем случае была взята минимальная оценка $t^* = 3$ года, которая учитывает высокие скорости фильтрации карстовых вод по ЗБФМ и соответствует требованию консервативности миграционного прогноза.

Начальное граничное значение относительной концентрации условного загрязнителя $C_0 = 1$ в инфильтрационных водах задавалось на части территории модели, которая соответствует области формирования карстовых подземных вод плато Ай-Петри.

В результате численного решения начально-краевой задачи (1) – (3) на контрольный период прогноза $t^* = 3$ года на локальной модели-врезке с помощью моделирующей системы «*Processing Modflow*» получено распределение прогнозной относительной концентрации условного загрязнителя $C_{rel} = c(z^*, t^*)$ на глубине z^* второго (условно напорного) горизонте подземных вод. Диаграмма этого распределения показана на рис.4.



Р и с . 4 . Модельная диаграмма уязвимости подземных вод Кацивельского участка по прогнозной относительной концентрации условного загрязнителя C_{rel} .

Детальность модели позволила выделить десять градаций зон с различными порядками прогнозной относительной концентрации загрязнителя, которые показаны разными оттенками серой шкалы. При этом значения концентрации можно рассматривать как градации оценки уязвимости подземных вод, а порядки малости – логарифмы концентрации с обратным знаком по формуле (5) – как градации оценки их защищенности.

На диаграмме рис.4 отчетливо просматриваются две субмеридиональные ЗБФМ с областями субмариной разгрузки, описанные выше. Правая – по древнему оползню г. Кошка, и левая – по разломной зоне Чолбан-Дере западнее мыса Кикинеиз. Как и следовало ожидать, карстовые подземные воды в областях субмариной разгрузки ЗБФМ имеют относительно низкую защищенность (класс 4), по сравнению с относительно защищенными соседними участками береговой зоны (класс 8 и выше).

Рассмотренный модельный подход ближе подводит к оценке полной уязвимости и защищенности подземных вод по сравнению с результатом рассмотренного выше индексно-рейтингового метода «Горно-крымского подхода», так как здесь учитываются как вертикальные, так и латеральные гидродинамические направления преференциальной фильтрации и миграции (зоны карста, тектонические линейные зоны и т.д.). Они учтены в параметрах модели (инфильтрации, вертикальных и горизонтальных коэффициентах фильтрации).

Отметим, что полученный результат является лишь первым опытом подобной модельной оценки. Для получения более совершенных модельных прогнозных оценок защищенности и уязвимости подземных карстовых массивов необходимо дальнейшее усовершенствование базовых знаний об основных модельных параметрах исследуемой территории – вертикальных и горизонтальных коэффициентах фильтрации, зонах сосредоточенного преференциального питания и разгрузки (в том числе субмаринной), характерных для водообмена карстовых систем.

Общая проблема заключается в недостатке этих данных для детальной разработки трехмерной модели. Определенную помощь в ее решении могут предоставить концептуальные модели карстообразования, такие как модели трансверсального спелеогенезиса [16] и др.

По мере детализации указанной информации об исследуемой территории, а также с совершенствованием математических и компьютерных методов моделирования эффективность и перспективность модельных методов оценки защищенности и уязвимости подземных вод будет возрастать.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шестопалов В.М., Богуславський О.С., Клімчук А.Б., Фесенко А.В., Годенко Г.Є. Прогнозування ресурсів підземних вод південно-західної частини Гірського Криму / Зміни земних систем у Східній Європі.– Київ: ІГН НАНУ, ЦАКДЗ НАНУ, 2010.– С.422-438.
2. Шестопалов В.М., Богуславский А.С., Климчук А.Б., Фесенко А.В., Годенко Г.Е. Моделирование ресурсов подземных вод юго-западной части Горного Крыма // Геология и полезные ископаемые Мирового океана.– 2008.– 4.– С.5-28.
3. Шестопалов В.М., Иванов В.А., Богуславский А.С., Казаков С.И., Кузнецов А.С. Мониторинг гидрогеологических и инженерно-геологических условий и рисков береговой зоны Горного Крыма // Системы контроля окружающей среды.– Севастополь, 2013.– вып.19.– С.8-17.
4. Shestopalov V.M., Ivanov V.A., Bohuslavsky A.S., Kazakov S.I. Engineering-geological hazards and management in the Mountain Crimea coastal zone // J. Coastal Conservation.– Springer, Netherlands, 2008.– v.12.– P.169-179.
5. Ciang W.H., Kinzelbach W. 3D Groundwater modeling with PMWin.– Springer, 2001.– 346 p.
6. McDonald M.C., Harbaugh A.W. MODFLOW. A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model.– U.S. Geological Survey, Open-file report 83-875, Chapter A1.– 1988.
7. Zheng C., Wang P.P. MT3DMS. A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems / Documentation and user's guide.– Departments of Geology and Mathematics, University of Alabama, 1998.
8. Михайловский С.Н., Пчелинцев В.Ф. Гидрогеологические исследования в Кучук-койском и Кикенеизском районах Южного Берега Крыма. Гидрогеологические исследования в Леменском районе Южного Берега Крыма.– М.-Л.: Гос. научно-техническое и геологоразведочное изд-во, 1932.– 187 с.
9. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability – International Contributions to Hydrogeology / Eds J.Vrba, A.Zaporozec.– International Association of Hydrogeology, Heise, Hanover, 1994.– v.16.– 131 p.

10. *Shestopalov V.M., Rudenko Yu.F., Bohuslavsky A.S., Bublias V.N.* Chernobyl-born radionuclides: aquifers protectability with respect to preferential flow zones / *Applied Hydrogeophysics*. Ed. H.Vereecken.– Springer, 2006.– P.341-376.
11. *Шестопалов В.М., Богуславский А.С., Бублясь В.Н.* Оценка защищенности и уязвимости подземных вод с учетом зон быстрой миграции.– Киев: НИЦ РПИ, ИГН НАНУ, 2007.– 120 с.
12. *Шестаков В.М.* Учет геологической неоднородности – ключевая проблема гидрогеодинамики // *Вест. Моск. ун-та.*– 2003.– 4, 1.– С.25-27.
13. *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, final report COST Action 620, European Commission, Directorate-General for Research / Ed. F.Zwahlen.*– EUR 20912.– Luxemburg, 2004.
14. *Daly D., Dassargues A., Drew D., Dunne S., Goldscheider N., Neale S., Popescu I.C., Zwahlen F.* Main concepts of the European approach for (karst) groundwater vulnerability assessment and mapping // *Hydrogeol J.*– 2002.– 10.– P.340-345.
15. *Шестопалов В.М., Климчук А.Б., Токарев С.В., Амеличев Г.Н.* Оценка уязвимости подземных вод районов открытого карста // *Спелеология и карстология.*– 2009.–№ 2.– С.11-29.
16. *Speleogenesis: Evolution of karst aquifers / Eds Klimchouk A.B., Ford D., Palmer A., Dreybrodt W.*– Huntsville: Natl. Speleol. Soc., 2000.– 800 p.

Матеріал поступив в редакцію 22.11.2014 г.

АНОТАЦІЯ Розглядаються умови формування, шляхи руху і вразливість до забруднення карстових підземних вод південно-західній частині гірського Криму. За допомогою тривимірної гідрогеологічної моделі вивчені зони швидкої фільтрації і можливої субмаринної розвантаження підземних вод з плато Ай-Петрі через берегову зону на прикладі території детальних досліджень в районі пмт.Кацівелі. Розроблено модельний метод і виконана попередня оцінка уразливості підземних вод карстового формування досліджуваної території.

ABSTRACT The formation conditions, the motion path and the vulnerability to pollution of karst groundwater in the south-western mountain Crimea. Using the three-dimensional hydrogeological model the rapid filtration zones and areas of possible submarine groundwater discharge to the Ai-Petri plateau through the coastal zone are studied on detailed studies in Katsiveli as example. The model method is developed and the preliminary assessment of groundwater vulnerability of karst formation is performed in area under study.