



В.М. Шестопапов, А.Б. Климчук, С.В. Токарев, Г.Н. Амеличев

Оценка уязвимости подземных вод районов открытого карста (на примере массива Ай-Петри, Крым)

Шестопапов В.М., Климчук А.Б., Токарев С.В., Амеличев Г.Н. Оценка уязвимости подземных вод районов открытого карста (на примере массива Ай-Петри, Крым) // Спелеология и карстология, - № 2. – Симферополь. – 2009. – С. 11-29.

Резюме: Резкое возрастание структурной неоднородности геологической среды и неоднородности фильтрационных и физико-механических свойств пород в ходе развития карста является главной причиной высокой чувствительности природных систем в карстовых регионах к различного рода антропогенным воздействиям, и причиной возникновения разнообразных и острых геоэкологических проблем. Уязвимость подземных вод карстовых районов к загрязнениям в целом очень высока, но крайне неравномерна по площади. Специфика природных условий и процессов в карстовых регионах требует особых подходов к природопользованию и охране геологической среды, в частности – к оценке уязвимости подземных вод.

В работе рассматриваются концептуальные основы и методы оценки и картирования уязвимости подземных вод карстовых районов. На основе анализа, обобщения и адаптации существующих зарубежных методов разработана методика оценки уязвимости подземных вод районов открытого карста. Представлен опыт ее реализации для массива Ай-Петри, типичного карстового района Горного Крыма, который является основной областью питания региональной водоносной системы его юго-западной части.

Ключевые слова: уязвимость подземных вод, карст, гидрогеология карста, Ай-Петри, Горный Крым, загрязнение подземных вод, оценка уязвимости подземных вод, картирование уязвимости подземных вод.

Шестопапов В.М., Климчук О.Б., Токарев С.В., Амеличев Г.М. Оцінка уразливості підземних вод районів відкритого карсту (на прикладі масиву Ай-Петрі, Крим). // Спелеологія і карстологія, - № 2. – Симферополь. – 2009. – С. 11-29.

Резюме: Різке зростання структурної неоднорідності геологічного середовища і неоднорідності фільтраційних і фізико-механічних властивостей порід в ході розвитку карсту є головною причиною високої чутливості природних систем в карстових регіонах до різного роду антропогенних впливів, причиною виникнення різноманітних і гострих геоэкологічних проблем. Уразливість підземних вод карстових районів до забруднень в цілому дуже висока, але край нерівномірна за площею. Специфіка природних умов і процесів в карстових регіонах вимагає особливих підходів до природокористування і охорони геологічного середовища, зокрема – до оцінки уразливості підземних вод.

У роботі розглядаються концептуальні основи і методи оцінки і картування уразливості підземних вод карстових районів. На основі аналізу, узагальнення і адаптації існуючих зарубіжних методів розроблена методика оцінки уразливості підземних вод районів відкритого карсту. Представлений досвід її реалізації для масиву Ай-Петрі, типового карстового району Гірського Криму, який є основною областю живлення регіональної водоносної системи його південно-західної частини.

Ключові слова: уразливість підземних вод, карст, гідрогеологія карсту, Гірський Крим, Ай-Петрі, забруднення підземних вод, оцінка уразливості підземних вод, картування уразливості підземних вод.

Shestopalov V.M., Klimchouk A.B., Tokarev S.V., Amelichev G.N. Groundwater vulnerability assessment of regions of open karst (on example of the Ai-Petri massif, Crimea) // Speleology and Karstology. – N 2. – Simferopol. – 2009. – P. 11-29.

Abstract: Steep growth of structural heterogeneity of the geological environment and of heterogeneity of percolation and physical-mechanical properties of rocks in the course of karst development is the main reason for high sensitiveness of natural systems in karst regions to different anthropogenic influences, and the reason for the origin of various and often severe geoecological problems. Vulnerability to contaminations of groundwaters in karst regions is generally very high, although uneven through an area. The specificity of environmental conditions and processes in karst regions requires special approaches to land use and human practices and to protection of the geological environment, in particular – to the groundwater vulnerability assessment. This paper considers conceptual foundations and methods of groundwater vulnerability assessment and mapping in karst regions.

Based on the analysis, summarization and adaptation of existing approaches, a method of groundwater vulnerability assessment is developed for regions of open karst settings. The realization of this method is presented for the Ai-Petri massif, a typical karst region of the Mountainous Crimea and the main recharge area of the regional groundwater system of its south-western part.

Keywords: groundwater vulnerability, karst, karst hydrogeology, Mountainous Crimea, Ai-Petri, contamination of groundwater, vulnerability assessment, vulnerability mapping.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время огромную актуальность приобретает проблема обеспечения населения Украины качественной питьевой водой, что становится одним из важнейших факторов устойчивого развития и вопросов национальной безопасности. В решении этой проблемы стратегическое значение придается подземным водам, увеличению использования источников природно-чистых подземных вод и обеспечению действенной охраны их ресурсов. Для Крыма проблема обеспечения качественной питьевой водой стоит особенно остро, обуславливает ощутимое возрастание социального напряжения, снижение привлекательности региона для туристов и другие негативные социально-экономические и экологические последствия.

В подходах к решению проблемы эффективного и устойчивого использования подземных источников водоснабжения Крыма до настоящего времени практически не учитывается *карстовая* природа подземных водоносных систем большей части (84 %) Крыма. Ресурсы подземных вод, формирующиеся в пределах интенсивно закарстованной Главной гряды Крымских гор, играют огромную роль в водоснабжении как крупных городов и курортов, так и большого числа мелких населенных пунктов южной части полуострова. Карстовые коллекторы содержат подземные воды высокого качества, но обладают рядом специфических свойств, определяющих необходимость особых подходов к их использованию и охране. Для карстовых районов характерно несовпадение поверхностных и подземных водосборов. Карстовые коллекторы отличаются крайне высокой степенью концентрации и локализации подземного стока, очаговым характером питания и разгрузки, очень высокими скоростями движения вод и низкой способностью к самоочищению и рассеиванию загрязнителей (Дублянский, Кикнадзе, 1984; Климчук, 2008). Таким образом, их уязвимость к загрязнениям в целом очень высока, особенно в областях питания, которые обычно обширны и простираются далеко за пределы охранных зон водозаборов, устанавливаемых с использованием стандартных подходов.

В Украине до сих пор не существует научно-методической и нормативно-правовой базы оценки уязвимости (защищенности) подземных вод в условиях карста. В то же время в ряде европейских стран и в ЕС в целом разработаны и законодательно закреплены специальные методы оценки и картирования уязвимости ресурсов карстовых вод. Этот опыт должен адаптироваться к местным условиям и внедряться в практику охраны и использования подземных вод карстовых районов Украины.

Настоящая работа посвящена методике крупномасштабной оценки и картирования уязвимости

подземных вод в условиях открытого карста, а также представляет первый опыт ее реализации для массива Ай-Петри, типичного карстового района Горного Крыма, который является основной областью питания региональной водоносной системы его юго-западной части.

КАРСТ И ЕГО РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ УСЛОВИЙ СРЕДЫ

Сущностью карстового процесса и важнейшим и уникальным свойством карстовых водообменных систем является прогрессирующее возрастание проницаемости пород и пространственной неоднородности и анизотропии емкостных и фильтрационных свойств карстовых коллекторов в результате активной циркуляции вод в растворимых породах и сопутствующего спелеогенеза (Климчук, 2008; Klimchouk et al., 2000). В результате развития карста происходит интенсификация водообмена и кардинальное изменение его структуры, а формируемая огромная пространственная неоднородность емкостных и фильтрационных свойств приводит к многоуровневности фильтрационной среды, к которой неприменимо допущение об условной сплошности.

Резкое возрастание структурной неоднородности геологической среды и неоднородности фильтрационных и физико-механических свойств пород в ходе карстогенной эволюции является главной причиной высокой чувствительности природных систем в карстовых регионах к различного рода антропогенным воздействиям и причиной возникновения разнообразных и острых геоэкологических проблем. Специфика природных условий и процессов в карстовых регионах требует особых подходов к природопользованию и охране геологической среды, в частности – к оценке уязвимости подземных вод. Особенности развития карста и его геолого-экологическая роли существенно различаются в различных типах карста.

Типология карста

Проблема типологии карста сложна и многогранна, ей посвящена обширная литература. Оставляя за рамками данной работы ее всесторонний обзор, отметим несколько важных линий в развитии подходов к типологии карста. Б.Н.Иванов (1956) и И.Г.Глухов (1961) подчеркивали важность с точки зрения формирования подземных вод и развития карста наличия или отсутствия, а также проницаемости, некарстующегося покрова над растворимыми породами, предложив выделять в качестве основных типов карст *открытый* (покров отсутствует), *полуоткрытый* (присутствует проницаемый покров) и *закрытый* (присутствует слабопроницаемый покров). Б.Н.Иванов (1956) впервые высказал идею о придании этим типам

эволюционного значения, рассматривая их как стадии развития карста на фоне восходящих неотектонических движений и геоморфологической эволюции. В работах Дж.Квинлана (Quinlan, 1978) и Р.А.Цыкина (1990) разграничивается типологическая роль покровных толщ разного по отношению к карсту возраста: карст, сформированный до образования покрова и им перекрытый (палеокарст) и карст, сформированный после образования и при наличии покрова (собственно глубинный карст). Все эти идеи легли в основу схемы эволюционной типологии карста, разработанной Климчуком (Klimchouk, 1996) и Климчуком и Фордом (Klimchouk, Ford, 2000), рассматривающей типы карста в контексте общей геолого-геоморфологической эволюции и гидрогеологического цикла. В настоящее время используются следующие критерии выделения основных типов карста по отношению к покровным отложениям:

В закрытом карсте процесс на поверхности не выражен, за исключением отдельных провальных форм, но может интенсивно развиваться под покровом с образованием полостей и карстовой проницаемости. В полуоткрытом карсте (к нему относятся также территории со слабопроницаемым покровом, частично вскрытым эрозией) процесс выражен на поверхности в виде провальных и поглощающих форм. В открытом карсте некарстуемый покров отсутствует (за исключением почвенного) и на растворимых породах развиваются полноценные карстовые ландшафты. Характерной особенностью карстовых ландшафтов в открытом и полуоткрытом карсте является преобладание замкнутых форм, а также недоразвитость эрозионных систем и гидросети ввиду развитого дренирования подземными системами стока.

Факторы и процессы карстообразования в закрытых гидрогеологических структурах существенно отличны от таковых в гидрогеологически открытых обстановках, тогда как полуоткрытые структуры являются переходными от закрытого карста к открытому. Районы открытого и закрытого карста характеризуются принципиально различными условиями питания и гидродинамическими профилями. В открытом карсте присутствуют все гидродинамические зоны, тогда как в закрытом карсте часто представлена только одна зона – полного насыщения, ее подзона напорных вод (рис. 1).

Кардинальные отличия в условиях питания и циркуляции подземных вод в закрытых и открытых условиях выражаются в формировании основных соответствующих генетических типов карста (спелеогенеза), различаемых в последние годы – *гипогенного* и *эпигенного*. Гипогенные и эпигенные карстовые системы связаны с разными типами и сегментами региональных водообменных систем и, соответственно, формируются в различных гидродинамических, гидрохимических и термальных условиях.

Гипогенный карст формируется в условиях напорных водоносных комплексов за счет питания растворимых толщ подземными водами, поступающими преимущественно снизу от подстилающих пород. Он генетически не связан с поверхностью и может развиваться на

различных, в т.ч. значительных (до 1000 м и более) глубинах. При раскрытии гидрогеологических структур и выведении гипогенного карста в неглубокое залегание (безнапорные, сдренированные условия) он становится реликтовым. Гипогенные формы в условиях неглубокого залегания могут отчасти наследоваться и перерабатываться эпигенным карстообразованием. В гипогенном спелеогенезе действуют механизмы подавления обратной связи между расходом и скоростью роста каналов, т.е. подавляется тенденция к избирательному развитию каналов, характерная для эпигенного спелеогенеза (Климчук, 2006, 2008; Klimchouk, 2000, 2003, 2007). При наличии соответствующих структурных предпосылок это приводит к формированию первазийной пустотности. Карстовая пустотность гипогенного происхождения может намного превышать таковую в гидрогеологически открытом карсте (примерно в 5 раз в плане и на порядок в объеме), но закарстованные площади обычно имеют кластерное распределение. Основная гидрогеологическая роль гипогенного спелеогенеза состоит в развитии (усилении) вертикальной гидравлической связности горизонтов в слоистых водонапорных системах.

Эпигенный карст формируется в открытых (безнапорных) гидрогеологических условиях, в непосредственной генетической связи с поверхностью и поверхностным питанием, концентрированность которого возрастает в ходе эволюции карстового рельефа. Эпигенный спелеогенез приводит к развитию преимущественно древовидных полостных структур, обеспечивающих возрастание концентрации стока в направлении гидравлического градиента. Проницаемость закарстованных пород отличается крайне высокой неоднородностью и анизотропией. Типичные каналовые системы эпигенного происхождения демонстрируют невысокую площадную плотность (в среднем 16 км/км²) и небольшие площадные (6,4%) и объемные (0,4%) показатели карстовой пустотности, но проводят практически весь сток, часто на большие расстояния (Климчук, 2008). В зрелых карстовых системах средние скорости карстовых вод измеряются сотнями и тысячами м/сутки, а движение вод почти всегда турбулентно. Режим источников отличается большими вариациями расходов.

Различные типы карста часто образуют смежные зоны, положение и развитие которых контролируется дифференцированными неотектоническими движениями. На рис. 1 приведен типологический гидрогеологический профиль Горного Крыма, где в тектонически погруженных блоках (Байдарская котловина) развивается закрытый карст, а Главная гряда представляет карст открытого типа.

В Горном Крыму преимущественное внимание уделялось исследованиям открытого карста, широко и ярко представленного в обнаженных массивах Главной гряды, где с ним связано формирование основных ресурсов подземных вод. В контексте региональной палеогеографии (денудация и отступление мел-палеогенового покрова к северу по мере воздымания Горного Крыма) можно предположить значительную роль гипогенного спелеогенеза в закарстовании Главной гряды,

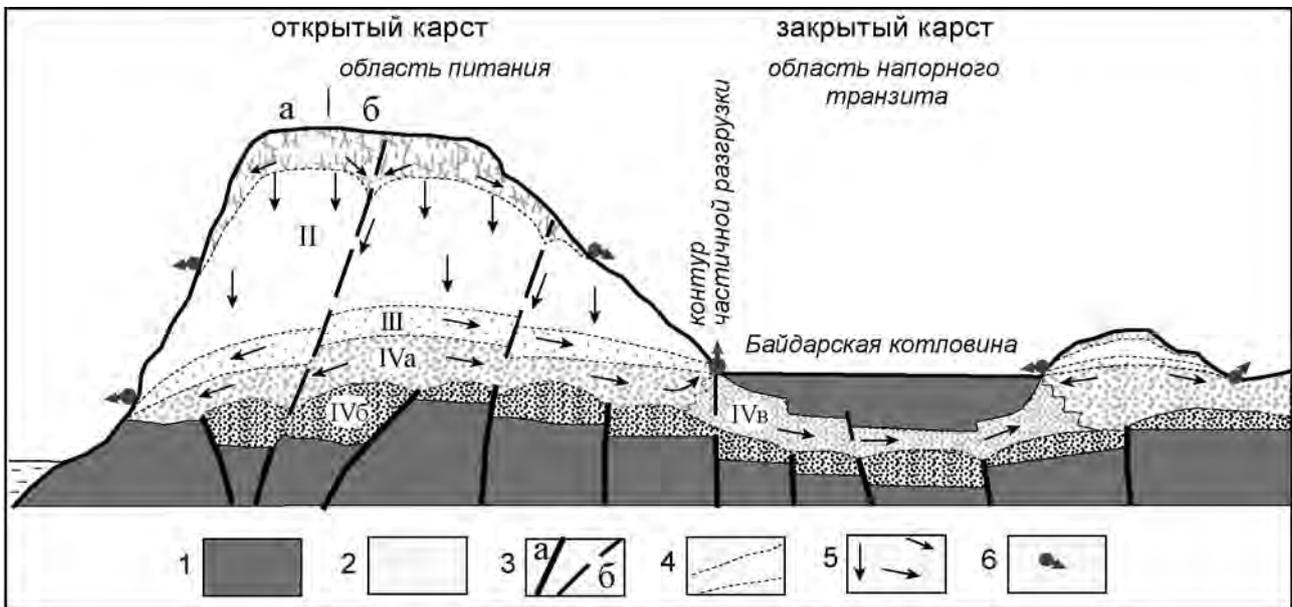


Рис. 1. Схема гидродинамической зональности карстовых вод Горного Крыма (составлена А.Б.Климчуком на основе схем Глухова (1961), Шутова (1971) и Дублянского (1977), с дополнениями). Карстовые массивы: а - цокольные приморские, б – склоновые континентальные. Гидродинамические зоны: I – эпикарстовая (преимущественно рассеянное питание; безнапорные воды, образующие подвешенный горизонт); II – аэрации (вадозная - преимущественно нисходящее свободное движение вод по трещинам и каналам); III – сезонных колебаний уровня (эпифреатическая; перемежающиеся условия зон II и IVa); IV – зона полного насыщения; подзоны: IVa – преимущественно безнапорных вод открытого карста с интенсивным водообменом, с локальным напором в каналах (фреатическая); IVb - напорных вод с интенсивным водообменом; IVв – напорных вод (артезианского напора) закрытого карста с замедленным водообменом. Условные обозначения: 1 – слабопроницаемые породы, 2 – карстующиеся породы, 3 – тектонические нарушения: 3а - в цоколе, 3б – в карстующихся породах, 4 – границы гидродинамических зон, 5 – направления движения подземных вод, 6 – карстовые источники.

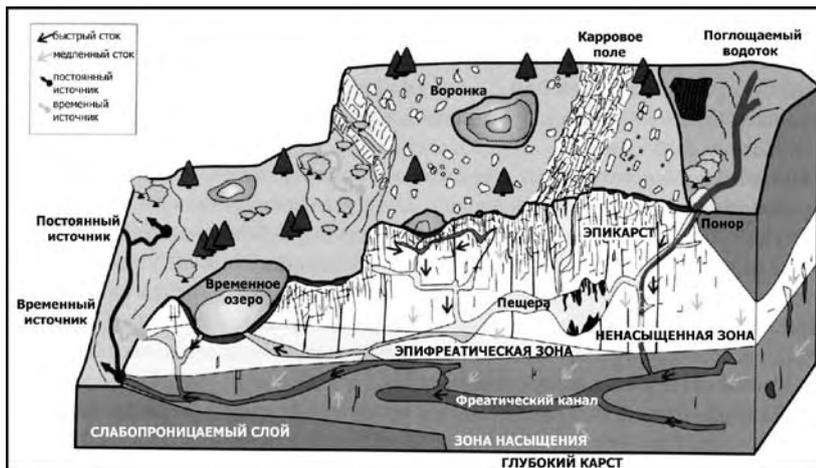


Рис. 2. Концептуальная модель подземного стока в открытом карсте (по Ravbar, 2007).

с фоссилизацией или переработкой соответствующих форм при последующем карстообразовании в условиях открытого карста. Соответствующие свидетельства накапливаются и ждут своего специального изучения и осмысления.

Концептуальная модель и гидродинамическая зональность эпигенной карстовой системы (открытый карст)

Схема гидродинамической зональности карстовых вод, приведенная на рис. 1, детализируется на рис. 2 в части показа разнообразия условий питания и различных компонентов стока.

Для горных массивов открытого карста общеприняты представления о том, что формирование карстовых

вод связывается с тремя видами питания: инфильтрационным (рассеянное проникновение в почву и породу атмосферной воды и склонового стока), инфлюационным (проникновение в породы сосредоточенного стока) и конденсационным (Дублянский, Кикнадзе, 1984). Конденсационное питание на уязвимость подземных вод не влияет и тут не рассматривается, хотя следует учитывать возможную роль конденсационных процессов в сбросе и включении в гидрогеологическую систему загрязнений, привносимых в полости с аэрозолями, как выявлено для чернобыльского цезия на массиве Чатырдаг (Klimchouk, Gudzenko, 1996). Прочие виды питания могут определяться и картироваться по геоморфологическим и гидрологическим признакам.

Возможна дальнейшая дифференциация видов питания, позволяющая выделять площадную и очаговую инфильтрацию, а также линейную и очаговую инфлюацию.

Инфлюационное питание представляет собой прямой вклад в концентрированный (шахтный, каналовой, или быстрый) сток в карстовой системе и быстро достигает водонасыщенной зоны. Инфильтрационное питание разделяется на компоненты быстрой и медленной фильтрации при прохождении через эпикарстовую зону, представляющую собой подсистему карста с особыми гидрогеологическими и морфогенетическими функциями, особенно важную в аспекте оценки уязвимости подземных вод.

Эпикарстовая зона, по сравнению с нижележащей частью зоны аэрации, характеризуется более равномерной и высокой проницаемостью и значительными емкостными свойствами. Она получает главным образом инфильтрационное питание, имеет изменчивую мощность в пределах от первых метров до десятков метров и содержит безнапорные воды, обычно образующие подвешенный водоносный горизонт, дренируемый в нижележащую зону аэрации как крупными трещинами, нарушениями и шахтами (зонами быстрой фильтрации), так и мелкими трещинами (Климчук, 1989; Klimchouk, 2000, 2004). Эпикарстовый водоносный горизонт может отсутствовать на участках слабовыраженных различий в проницаемости приповерхностной и нижележащей зон массивов. Эпикарстовая зона имеет изменчивые запасы и играет регулирующую роль в режиме карстовых водоносных систем, задерживая и распределяя инфильтрационное питание с поверхности. Задержка в прохождении инфильтрационных вод в зону аэрации может составлять, судя по режимным исследованиям в аналогичных районах, от 1-2 недель до нескольких месяцев, хотя интенсивное выпадение осадков может вызывать быстрое «поршневое» выдавливание вод из эпикарстового горизонта в крупные трещины и каналы, обуславливая прохождение пульсационной волны и паводковый сигнал на источниках. В пределах эпикарстовой зоны происходит разделение площадной инфильтрации на две компоненты на входе в нижележащую зону аэрации: быстрой фильтрации (воды, дренируемые из эпикарстового горизонта крупными трещинами и нарушениями, обычно преобразованными в подэпикарстовые шахты) и медленной фильтрации (воды, дренируемые из эпикарстового горизонта мелкими трещинами). Морфогенетические процессы эпикарста являются определяющими в образовании карстовых воронок на поверхности, которые однозначно связаны с зонами быстрой фильтрации (Климчук, 1989). Поэтому очаговая фильтрация в карстовых воронках идет на формирование компоненты быстрой фильтрации в зоне аэрации.

Выделение эпикарстовой зоны как подсистемы открытого карста и выявление ее свойств, проследившее с 80-х годов прошлого столетия под влиянием работ Дрока (Drogue, 1980), Уильямса (Williams, 1983) и Климчука (1989), оказалось чрезвычайно важным для оценки уязвимости подземных вод. При общих крайне неблагоприятных в аспекте уязвимости подземных вод характеристиках открытого карста, эпикарстовая зона играет существенную защитную роль. Поэтому многие европейские методы оценки уязвимости подземных вод учитывают эпикарст в качестве отдельного параметра или отдельным фактором в составе «покрова».

Зона аэрации (вадозная) (свободного нисходящего движения вод) может иметь мощность от нескольких метров до двух тысяч метров и более. Ее питание происходит через эпикарст или через «дыры» в эпикарсте, представленные понорами-поглотителями (инфлюация) и воронками – очагами инфильтрационного питания. В зоне аэрации различается быстрый («шахтный») сток (фильтрация по крупным разрывам и

разработанным по ним каналам), и медленный сток (по сетям мелких трещин).

Зона сезонных колебаний уровней (эпифреатическая) может иметь мощность от нескольких метров до 300-500 м. Питание вод этой зоны осуществляется за счет зоны аэрации.

Зона полного насыщения (фреатическая). Питание вод этой зоны осуществляется за счет зоны аэрации или путем перетока из смежных комплексов. Оценка уязвимости ресурса подземных вод заключается в оценке уязвимости вод основного коллектора в зоне полного насыщения – их чувствительности к загрязнениям, поступающим от поверхности через эпикарст и вадозную зону.

Гидродинамические свойства зоны полного насыщения в районах открытого и закрытого карста имеют существенные различия. В открытом карсте зону IV в целом можно характеризовать как безнапорную со свободной поверхностью, где локальный напор возникает в карстовых каналах, а также в нижней подзоне, где есть слои контрастной проницаемости. Для зоны полного насыщения открытого карста (вместе со смежной с ней зоной сезонных колебаний уровней) характерна сложная гидродинамика, обусловленная взаимодействием различных фильтрационных сред (каналовой и порово-трещинной) в условиях переменного питания различных видов (Климчук, 2008).

Многочисленные исследования показывают, что карстовые каналы, сформированные в условиях открытого карста, представляют незначительную долю общей пористости в диагенетически зрелых карбонатных породах (0.003-0.02 %), а водосодержание пород определяется, главным образом, трещинно-поровой средой. Однако почти весь (от 94 до 99,7 %) подземный сток обеспечивается каналовой проницаемостью (Worthington, Ford, Beddows, 2000; Климчук, 2008). Водопроницаемость интегрированных каналовых систем настолько высока, что значение прочих видов проницаемости в движении подземных вод в закарстованных породах оказывается пренебрежимо малым. Поэтому для гидрогеологических задач в карстовых районах, в частности для оценки уязвимости на выходе подземных вод (полной защищенности) решающее значение имеет адекватная характеристика каналовой проницаемости, которая может быть достигнута применением комплекса методов, обязательно включающего анализ спелеологических данных, эксперименты по мультитрассированию карстовых вод, инвентаризацию и изучение режима очагов разгрузки и др. Решающее значение для правильной интерпретации получаемой информации имеет применение современных спелеогенетических концепций.

ЗАЩИЩЕННОСТЬ И УЯЗВИМОСТЬ СИСТЕМЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И МЕТОДЫ ИХ ОЦЕНКИ

Степень подверженности подземных вод загрязнениям, поступающим на контуре питания (обычно с поверхности) выражается в понятиях защищенности (Роговская, 1976, Гольдберг, 1983, 1987, и др.) или уязвимости (Margat, 1968, и др.), имеющими одинаковый смысл, но обратные значения. Смысл

этих понятий заключается в постулировании того, что физическая среда обеспечивает некоторую природную защищенность подземных вод от антропогенных воздействий и загрязнений, которая может быть большей (меньшая уязвимость ресурса) или меньшей (большая уязвимость). Врба и Запорожец (Vrba, Zaporozec, 1994) предложили выделить не зависящую от источника загрязнения *собственную уязвимость* как внутреннее свойство системы подземных вод, которое характеризует чувствительность этой системы к антропогенным и/или природным воздействиям, в отличие от *специфической уязвимости* к тому или иному загрязнителю, которая также может оцениваться в конкретных задачах.

За последние 30 лет было предложено много подходов и методов оценки и картирования уязвимости подземных вод, обзоры которых выполнены в работах Daly and Drew (1999), De Maio et al. (2001), Zaporozec (2002), Daly et al. (2002), Civita and De Maio (2004), Ravbar (2007), Шестопапова и др. (2007). Большую роль в развитии концепции и методов оценки уязвимости подземных вод сыграла необходимость их приложения к карстовым территориям, которые отличаются крайне высокой сложностью и неоднородностью условий питания и фильтрационных свойств и развитием многокомпонентной системы подземного стока, отдельные компоненты которой обеспечивают быстрый и эффективный транспорт через зону аэрации и фреатическую зону, что определяет общую высокую уязвимость системы подземных вод (рис. 2). Одной из основных особенностей методов оценок, разработанных или адаптированных для карстовых территорий, является учет зон быстрой фильтрации (миграции).

Как выявлено новейшими исследованиями в некарстовых территориях (Шестопапов и др., 2007), стимулированных Чернобыльской катастрофой 1986 г., которая привела к радиоактивному загрязнению почв огромных территорий, тут также значительную роль в ускорении вертикального нисходящего транспорта загрязнений через зону аэрации в насыщенную зону и далее в нижележащие водоносные горизонты играют зоны быстрой фильтрации и миграции (ЗБФМ). В условиях Киевской области, например, такие зоны связаны с замкнутыми понижениями рельефа (западинами), которые, занимая до 8-10% общей площади территории, контролируют до 60% поверхностного стока, а скорости вертикальной нисходящей фильтрации и миграции в них в 4-8 раз превосходят фоновые. Таким образом, особую роль играют специфические формы рельефа, где преимущественная концентрация поверхностного стока сопряжена с быстрой фильтрацией. Роль гидрогеологически функциональных форм рельефа в уязвимости является особенно большой для систем подземных вод открытого карста, где концентрированное питание может осуществляться путем очаговой инфильтрации или инфлюации.

Под *уязвимостью системы подземных вод*, вслед за Врба и Запорожецем (Vrba and Zaporozec, 1994) и Шестопаповым и др. (2007), понимается ее чувствительность к загрязнениям, характеризуемая степенью развития комплексной барьерной функции

верхней части геологической среды, определяемая развитостью физических (проницаемость, дисперсивность) и геохимических (сорбция) барьеров. Уязвимость может оцениваться по защитным свойствам транзитной или покровной толщи пород на пути от поверхности земли до оцениваемого горизонта, куда инфильтруется загрязненная поверхностная вода (*уязвимость ресурса*), или по защитным свойствам геологической среды на всем пути от поверхности до выходов подземных вод в водозаборах или источниках, включая свойства водонасыщенной зоны (*уязвимость на выходе*, или, в терминах защищенности, – полная защищенность).

Оценка и картирование уязвимости подземных вод состоит в разделении исследуемой территории на зоны с различной степенью уязвимости. Такая оценка оценка чрезвычайно актуальна и особенно сложна в условиях открытого (полуоткрытого) карста. При этом ведущую роль играют условия питания подземных вод и их площадная изменчивость, распределение зон быстрой фильтрации (инфлюации), обеспечивающих концентрацию и эффективный перевод стока через vadозную зону к зоне полного насыщения, а также локализация и свойства карстовых систем стока в зоне полного насыщения (при оценке уязвимости на выходе подземных вод). Таким образом, изучение условий питания подземных вод в условиях карста и оценка их уязвимости являются тесно сопряженными проблемами.

Практически все методы оценки уязвимости в карстовых районах являются индексно-рейтинговыми. Параметрические методы (В.М.Гольдберг, В.А.Мироненко, В.Г.Румынина, И.С.Пашковский, К.Е.Питьева, И.С.Зекцер, В.М.Швец, С.Р.Крайнов, Л.М.Рогачева и др.), получившие широкое применение для некарстовых территорий, малоприменимы к условиям карста ввиду крайней неоднородности условий питания и характеристик фильтрационных сред и невозможности их адекватной генерализации. В последнее время разрабатываются методы оценки уязвимости на основе математического моделирования миграционных процессов (Шестопапов и др., 2007), применение которых в условиях карста затруднено по тем же причинам объективных трудностей в формализации условий и генерализации фильтрационных и миграционных параметров (неприменимость допущения условно-сплошной среды).

Опыт реализации оценки уязвимости (защищенности) подземных вод в Украине ограничен (см. недавний обзор и пример для части бассейна Днепра в работе Шестопапова и др., 2007) и полностью отсутствует применительно к карстовым регионам. В течение последних десятилетий в странах Евросоюза и в США разработаны и внедряются в практику более или менее специфические методы оценки и картирования уязвимости подземных вод в карстовых регионах (*GOD*, Foster, 1987; *DRASTIC*, Aller et al., 1997; *SINTACS*, Civita and De Maio, 2004; *Германский метод*, Hölting et al., 1995; *EPIK*, Doerfliger et al., 1999; *PI*, Goldscheider et al., 2000; *Ирландский метод*, Daly and Drew, 1999; *VULK*, Jeannin et al., 2001; *COP*, Zwahlen, 2004; *Словенский метод*, Ravbar and Goldscheider,

2006, Ravbar, 2007), методология которых постепенно сближается (Daly et al., 2002). Обзор большинства из них выполнен в работе Шестопалова и др. (2007) и тут не приводится.

Наряду с формированием общей методологии оценки уязвимости подземных вод, продолжается тенденция к разработке модификаций, часто получающих региональные наименования, в которых варьируют состав учитываемых факторов, оценочные критерии и шкалы. Несмотря на невозможность непосредственного сравнения результатов, полученных разными методиками, это является оправданным трендом, особенно в приложении к карстовым районам. Индивидуализация методов отражает необходимость учета региональных особенностей условий для достижения максимально адекватной оценки уязвимости подземных вод данного региона. Вариации в методике, на наш взгляд, допустимы даже в пределах одного региона, где есть существенные порайонные типологические различия условий. Например, подходы к оценке уязвимости подземных вод в районах открытого карста Горного Крыма и преимущественно закрытого карста Равнинного Крыма могут и должны различаться. Основой для региональной оценки и обоснования модификаций методик должно служить (в случае с карстом) специальное районирование по условиям его развития.

В рамках настоящей работы были проанализированы подходы, критерии и алгоритмы оценки существующих методов оценки уязвимости подземных вод в карсте на предмет концептуальной и методологической обоснованности, а также применимости к карстовым массивам Горного Крыма, как с точки зрения особенностей природных условий и карстовых систем, так и в плане обеспеченности исходными данными для оценки. В качестве опорной методологии для реализации в Горном Крыму избран Словенский метод (Ravbar, 2007), который является модификацией испанского *СОР*-метода, в свою очередь интегрирующего существенные элементы методов *ЕPIK* и *PI* и базирующегося на методологии, разработанной в ходе реализации европейского проекта COST Action 620 (Daly et al. 2002; Zwahlen 2004). Адаптация Словенского подхода к условиям Горного Крыма потребовала внесения существенных модификаций в части состава и группировки учитываемых факторов, поэтому можно говорить о развитии Горно-Крымского метода оценки уязвимости подземных вод массивов открытого карста. Вместе с тем, мы стремились максимально сохранять общую методологию и шкалы оценочных значений, принятых в Словенском методе и его предшественниках.

МАССИВ АЙ-ПЕТРИ И ЕГО РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД РЕГИОНА

Массив Ай-Петри входит в состав Горно-Крымской карстовой области, которая располагается в пределах мегантиклинория Горного Крыма (части Альпийской геосинклинальной области) и охватывает Главную гряды Крымских гор. Ее южной границей является береговая линия Черного моря, а северной – глубинный разлом, отделяющий мегантиклинорий от Скифской

платформы. Карстовые районы Главной гряды занимают осевую часть мегантиклинория. В пределах области карстуются преимущественно карбонатные породы палеозоя и мезозоя. В составе Главной гряды преобладают верхнеюрские (оксфорд-кимеридж, титон) и нижнемеловые (валанжин) известняки мощностью от 100-250 до 1000-1300 м, образующие моноклинально-блоковые массивы, цоколь которых почти повсеместно приподнят над уровнем моря. Цоколь слагают смятые в сложные складки слабопроницаемые отложения таврической серии и лежащие на них с угловым несогласием породы средней юры (аргиллиты, алевролиты и песчаники).

В связи с высокой раскрытостью массивов Главной Гряды тут повсеместно развит открытый карст с выраженным карстовым рельефом в пределах плато (яйл), развитой эпикарстовой зоной и мощной зоной аэрации (рис. 1). В массивах преобладают вертикальные колодцы и шахты, а также пещеры зоны сезонных колебаний уровня, имеющие эпигенное происхождение и являющие звеньями современных карстовых водоносных систем. Наличие реликтовых полостей с гипогенной морфологией и минерализацией указывает на древние эпохи закрытого карста и восходящего гипогенного спелеогенеза. В пределах районов открытого карста Главной гряды формируются значительные ресурсы подземных вод, имеющие большое значение для водоснабжения Крыма. Закрытый карст в настоящее время развит на отдельных участках тектонически погруженных блоков (Байдарская котловина).

Изучение условий формирования и оценка уязвимости карстовых вод проводилась в пределах массива Ай-Петри и частично Ялтинского, в границах распространения толщи карстующихся пород верхней юры на цокольном некарстующемся (таврическая свита) основании, на площади около 320 км² (рис. 3). Лишь в крайней западной части района исследований верхнеюрские карбонатные породы погружаются под меловой покров. Восточная граница на плато Ялтинского массива проходит по перешейку, под которым проходит Ялтинский гидротоннель. Южная, западная и северная границы проведены по выходам нижних крупных карстовых источников (Хаста-Баш, Скульский, Пания и др.), что примерно соответствует высоте 400-500 м.

Анализ и обобщение материалов предшествующих и новейших карстолого-гидрогеологических исследований показывают, что вершинная поверхность массива Ай-Петри и его западные и северо-западные склоны в пределах Айпетринского карстового района является основной областью питания региональной карстовой водоносной системы западной части Горного Крыма. Формирующиеся тут ресурсы подземных вод, которые по недавней прогнозной (модельной) оценке Шестопалова и др. (2008) составляют 471 тыс. м³/сут., имеют важнейшее значение для водоснабжения курортов южного побережья, населенных пунктов Байдарской долины, долины Бельбек и города Севастополя.

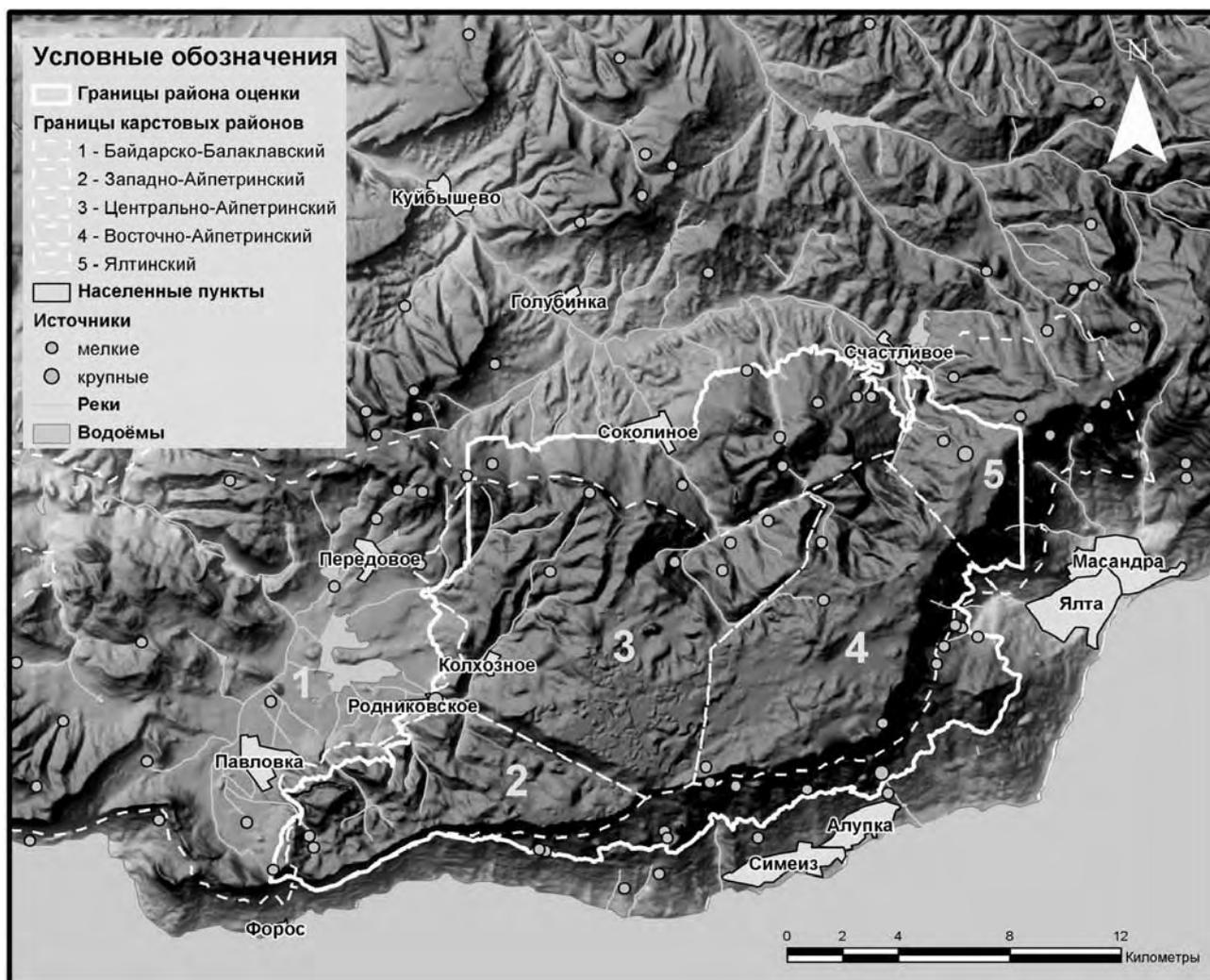


Рис. 3. Географическое положение, орогидрография и границы района исследования (по материалам ГИС УИСК «Карст Крыма»).

ОЦЕНКА УЯЗВИМОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД МАССИВА АЙ-ПЕТРИ (ГОРНО-КРЫМСКИЙ МЕТОД)

Оценка уязвимости подземных вод массива Ай-Петри производилась по отношению к зоне полного насыщения (уязвимость ресурса). Для оценки уязвимости на выходе подземных вод (полной) необходимы дополнительные исследования по выявлению структуры и характеристик карстовых систем в нижних гидродинамических зонах.

Оценка и картирование уязвимости подземных вод массива Ай-Петри производилась на основе ГИС-технологий в среде Arc-GIS. Подготовительные работы включали сбор, оцифровку и геокодирование доступных материалов и данных, характеризующих условия и факторы формирования и уязвимости карстовых вод, создание соответствующих баз геоданных и тематических карт в форматах, пригодных для визуализации и обработки методами ГИС-технологий. Собранные и созданные материалы и данные интегрированы в виде подсистемы «Ай-Петри» региональной ГИС «Карст Крыма» и характеризуют:

- геоморфологические условия, рельеф, поверхностное закарстование – на основе анализа топографических карт масштаба 1:25000, космоснимков различных масштабов, полевых работ;
- почвенный покров, эпикарст – на основе фондовых материалов (ИМР, ЯГГИГП и других организаций) и полевых работ;
- геологию и тектонику – на основе геологической карты масштаба 1:50000, фондовых материалов ИМР (КО УкрГГРИ), Южкогеоцентра, Ялтинской гидрогеологической партии и других организаций;
- подземное закарстование – на основе материалов Кадастра карстовых полостей Крыма (УИСК), данных текущих спелеологических исследований (Украинская спелеологическая Ассоциация), опубликованных материалов и полевых работ;
- гидрогеологические условия – на основе опубликованных и фондовых материалов (ИМР - КО УкрГГРИ, ЯГГИГП и др.).

Для создания детальной рельефной основы для геоинформационной и пространственного анализа прочих геоданных выполнена сплошная векторизация 5-метровых горизонталей топокарт м-ба 1:25000 на всю площадь (около 320 км²) Центрально-Айпетринского и Западно-Айпетринского карстовых районов и прилегающих склонов и построена

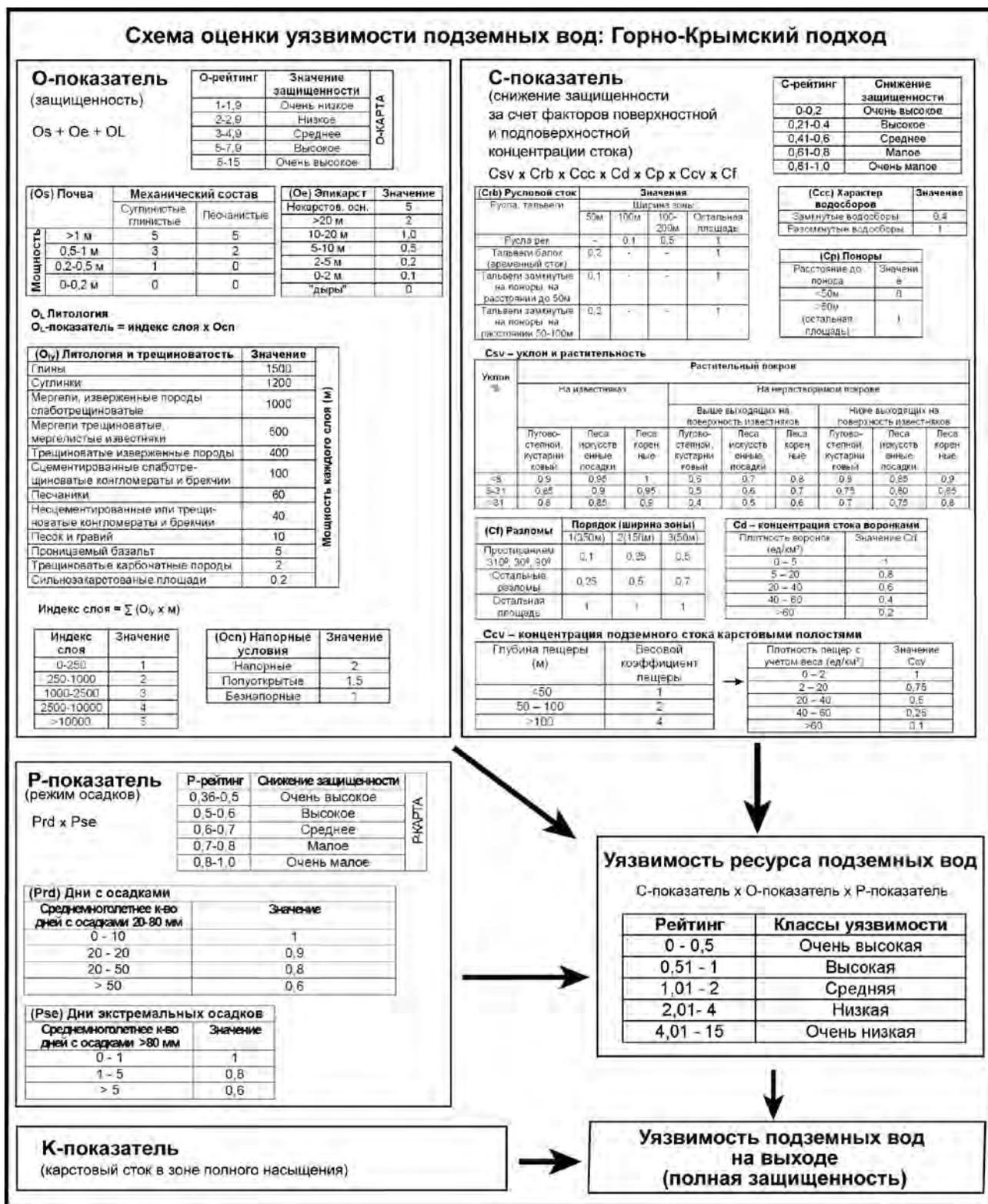


Рис. 4. Схема индексно-рейтинговой оценки показателей и факторов уязвимости подземных вод районов развития открытого карста (Горно-Крымский подход).

детальная трехмерная цифровая модель рельефа (ЦМР). Эта цифровая модель использована для создания аналитических карт параметров рельефа (уклонов, экспозиции, замкнутых водосборов и других геоморфологических элементов, проч.), используемых для выделения картографируемых

категорий уязвимости подземных вод по условиям питания и создания синтетических карт, создания серии трехмерных сцен различной освещенности, используемых для детального линейного анализа, а также для геовизуализации исследуемой территории в трехмерных сценах с различной нагрузкой.



Рис. 5. Схема оценки О-показателя.

Особенностями исследуемого района, важными для выбора и развития методики оценки уязвимости подземных вод, являются:

- относительно небольшая площадь;
- почти полное отсутствие покровных отложений;
- геоморфологическая выраженность платообразной поверхности массива;
- в целом интенсивное, но неравномерное развитие карста;
- недостаток данных, характеризующих площадное распределение отдельных факторов уязвимости/защищенности;
- недостаток данных, характеризующих структуру и функционирование карстовых систем в нижних гидродинамических зонах и направления подземного стока в разных режимах.

Именно ввиду последнего обстоятельства, настоящая оценка произведена лишь по отношению к зоне полного насыщения (уязвимость ресурса).

В основу производимой оценки положен COP-метод и словенский метод, в которых уязвимость ресурса определяется как производная трех показателей: свойства покрова (O), концентрация стока (C) и режим осадков (P). При оценке уязвимости на выходе подземных вод добавляется показатель (K), учитывающий время прохождения загрязнителя

по карстовой системе включая фреатическую зону, развитость карстовой системы в ней и вклад отдельных участков водосбора в формирование вод источников.

Несмотря на успешную реализацию методов COP и словенского в ряде районов Европы, они должны быть адаптированы к локальным условиям оцениваемой территории. Кроме того, эти методы содержат определенные упущения на концептуальном уровне, которые исправлены в разработанной нами методике. Адаптация и доработка базовых методов выразились в следующем:

- введена оценка эпикарстовой зоны в показатель «O»;
- введены оценки факторов концентрации стока в вадозной зоне (зон быстрой фильтрации) в показатель «C» (карстовых воронок, поноров, пещер, разломов) и опущены дифференциальная оценка поверхностных компонентов водопоглощающих комплексов (русел поглощаемых водотоков, крупных периодических озер, проч.) в связи с их неразвитостью в исследуемом районе (в отличие от карстовых районов Словении), а также оценка временной вариабельности инфлюационного питания.
- оценка климатического показателя режима атмосферных осадков, учитывающего среднегодовое количество осадков, а также частоту, продолжительность, и интенсивность максимальных осадков, остается компонентом методики, но опущена в реализации для массива Ай-Петри. Это обусловлено крупномасштабностью производимой оценки и сравнительно небольшой площадью исследуемого района, вариации режима осадков в пределах которого не отражаются доступными данными.

Общая схема оценки уязвимости подземных вод показана на рис. 4 и детализована по показателям и факторам в нижеследующем тексте, поясняющем особенности определения этих показателей и факторов для условий открытого карста массива Ай-Петри.

Перекрывающие слои (О-показатель)

Комплексный показатель «O» (рис. 5) включает оценку факторов защищенности подземных вод, обуславливающих задержку потенциальных загрязнителей и снижение возможности загрязнения основного коллектора подземных вод. Понятие «перекрывающие» в названии показателя включает все толщи выше зоны полного насыщения, включая вмещающие карстующиеся породы и покровные отложения (O_L), эпикарст (O_e) и почвенный покров (O_s).

Почвы (O_s). Оценка фактора осуществляется с учетом мощности и структуры почвенного покрова, которые тесно связаны с уклонами и положением на различных элементах рельефа. На обрывистых склонах, в пределах вершинных участков положительных форм и их склонов крутизной более 30° почвы практически отсутствуют или распространены недоразвитые и смытые (мощность 0-20 см) разности горно-луговых выщелоченных и горно-лесных бурых почв. На склонах средней крутизны (5-17°) формируются спорадически развитые и маломощные (20-50 см) горно-луговые почвы, а на плоских субгоризонтальных платообразных участках (<5°) и в пологих замкнутых депрессиях – среднемощные (50-100 см) и намывные (>100 см) разности.

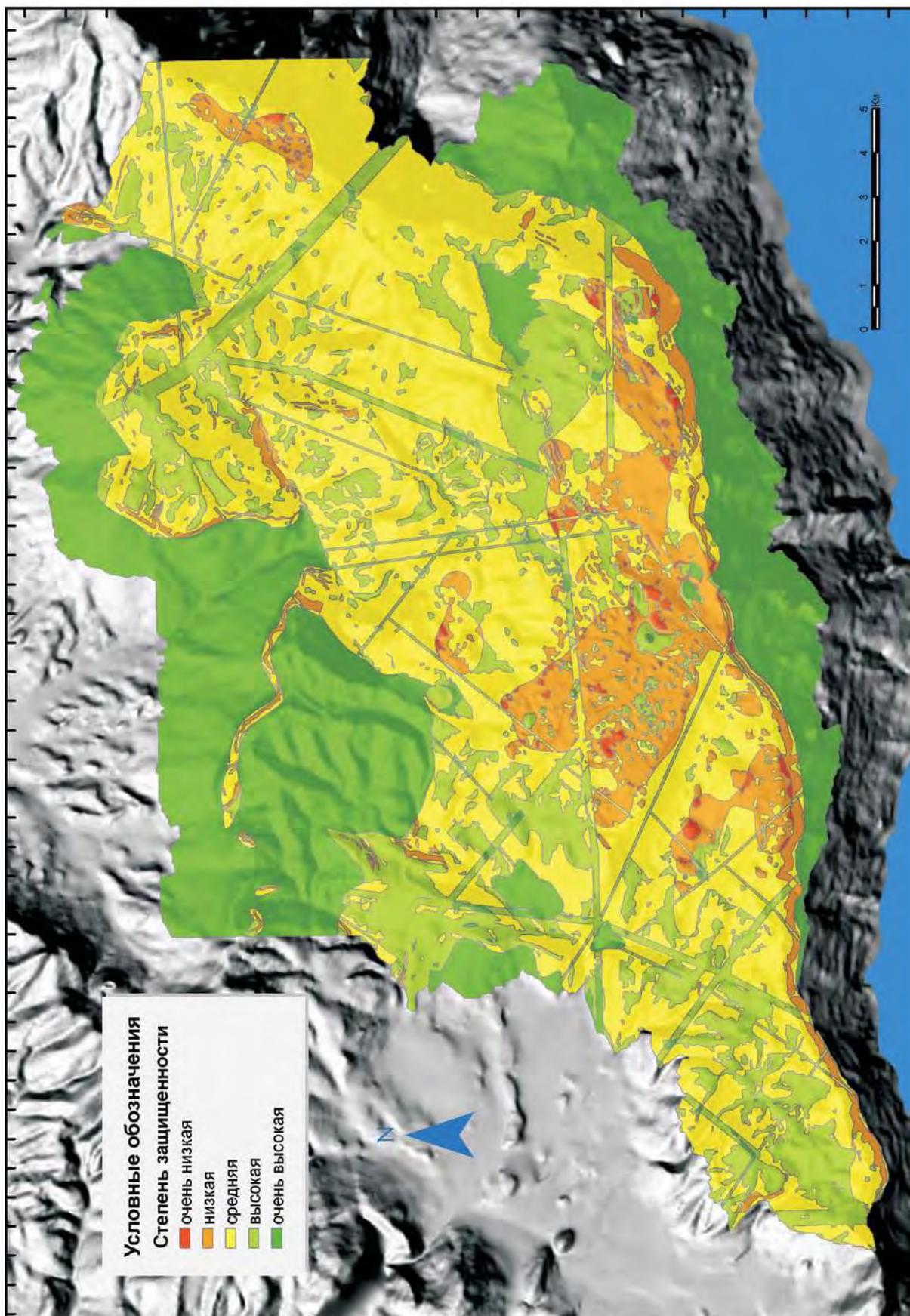


Рис. 6. Карта защищенности подземных вод (О-показатель) массива Ай-Петри.

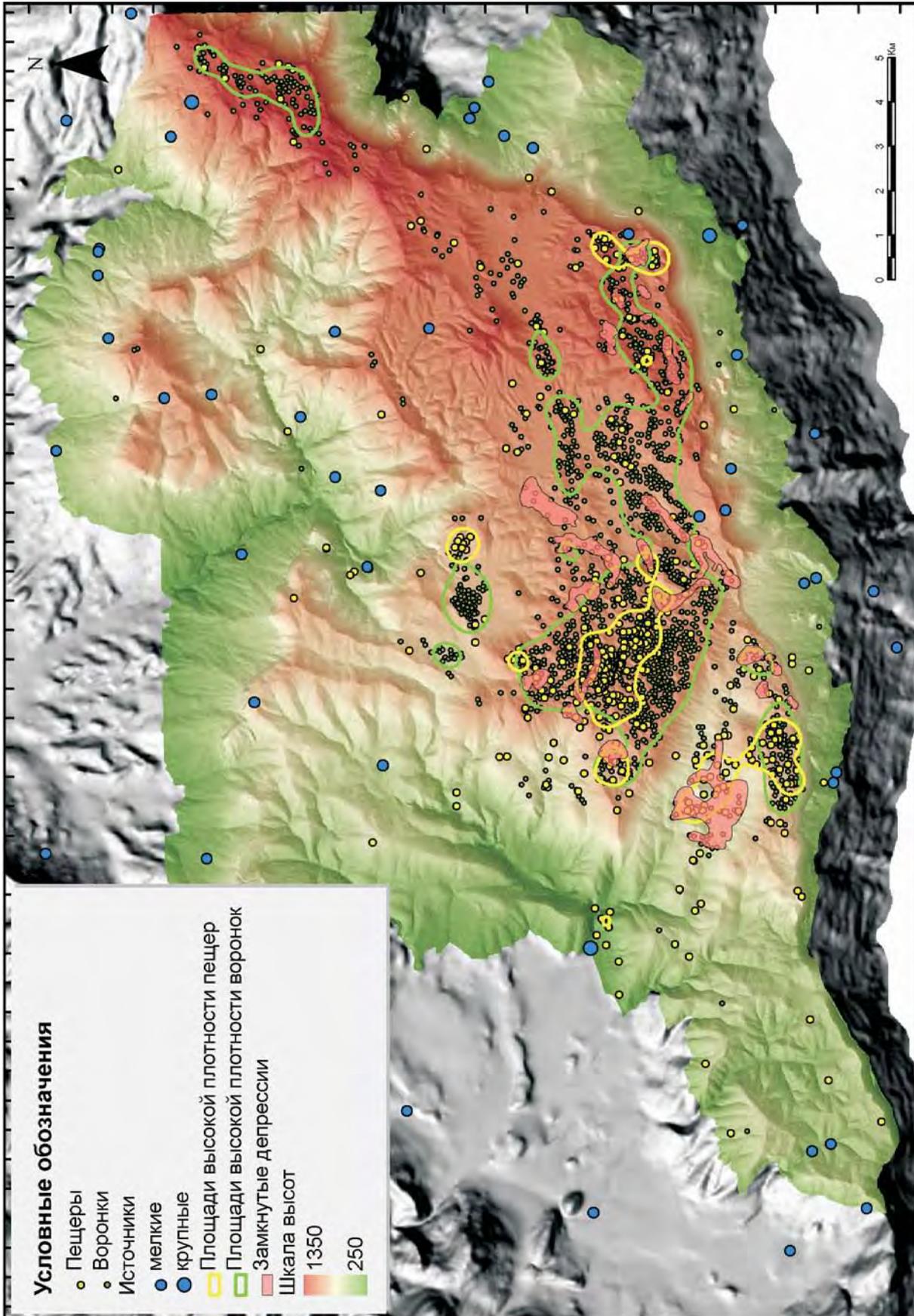


Рис. 7. Распределение карстовых воронок и пещер на массиве Ай-Петри (по материалам ГИС УИСК "Карст Крыма").

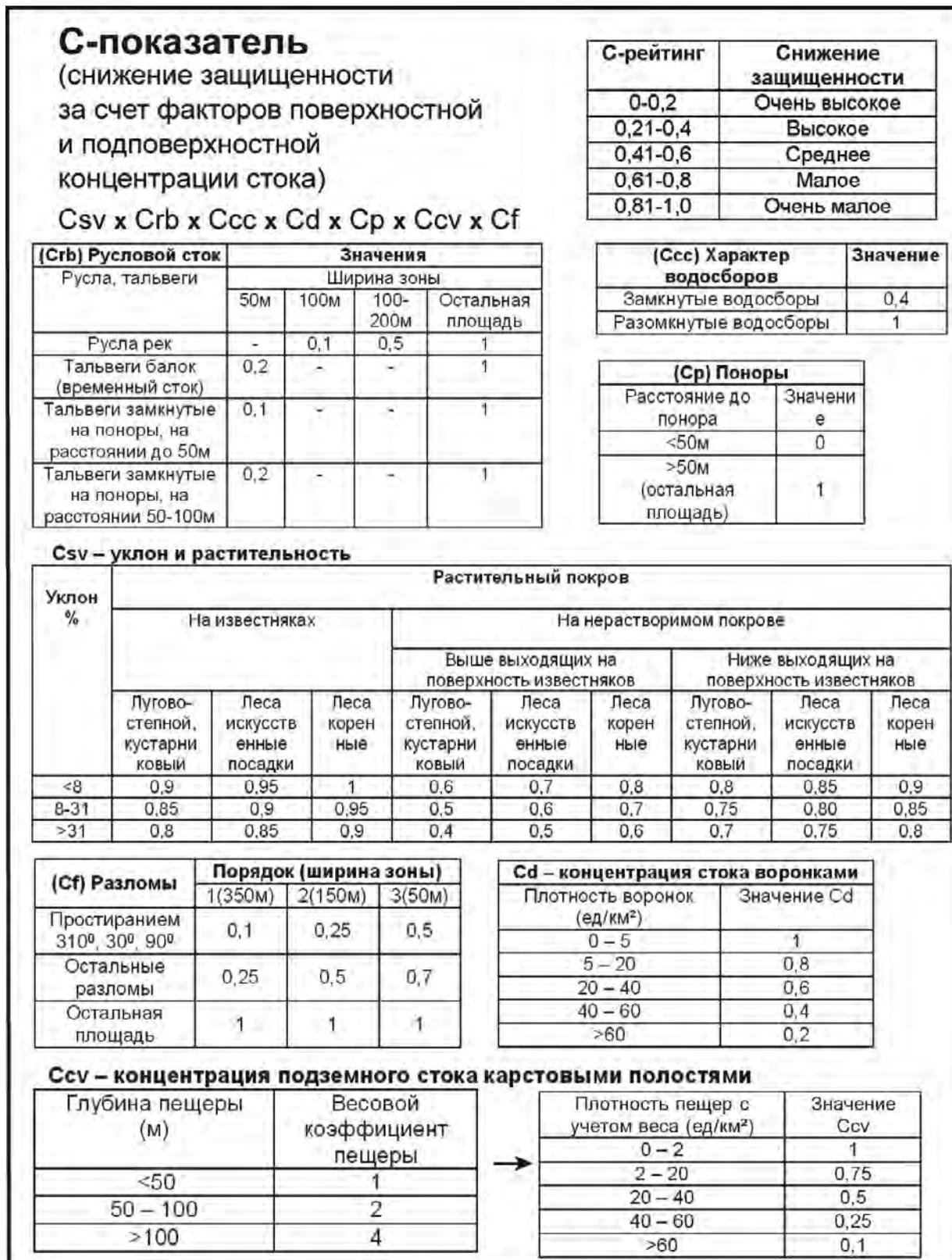


Рис. 8. Схема оценки С-показателя.

Для картографической оценки почвенного фактора нами использовался ландшафтно-геоморфологический подход, ГИС-технологии и дешифрирование крупномасштабных топокарт и космоснимков. Площади (участки) с оценочными характеристиками выделялись на основании анализа уклонов и выделения ландшафтно-геоморфологических элементов с типовыми почвенными условиями. Мощность почвенного покрова оценивалась отдельно для вершинной платообразной и для склоновой частей массива.

Литология (O_L). Оценка фактора производится по каждому слою или толще, для которых качественные или количественные характеристики проницаемости принимаются условно-однородными. Значения, присваиваемые различным литологическим разностям унаследованы от словенского метода и приведены в таблице «Литология и трещиноватость» на рис. 5. Показатель O_L определяется умножением этих значений на мощность и коэффициент напорных условий.

В пределах массива Ай-Петри преобладающее развитие имеет комплекс верхнеюрских карбонатных пород, залегающих на цоколе некарстующейся и малообводненной таврической серии. На севере и западе территории верхнеюрские породы погружаются под меловые отложения. На севере в пределах границ исследуемой территории на верхнеюрской толще залегают меловые известняки, по литологии и закарстованности аналогичные верхнеюрской толще. На западе, за пределами границ территории (Байдарская котловина), карбонатные породы уходят под покров слабопроницаемых меловых отложений, в связи с чем тут возникают напорные условия.

По сравнению с базовой словенской схемой, в принятую категоризацию O_L -показателя внесены определенные изменения. Нами не выделяются отдельно «закарстованные породы», так как 1) все трещиноватые закарстованные породы принимаются потенциально закарстованными; 2) оценка закарстованности производится по нескольким факторам, входящим в различные показатели. Мы оставили категорию «сильно закарстованные площади», но в базовой методике критерии их выделения внятно не определены. Для массива Ай-Петри такие площади выделены по контурам высокой (>60 карстовых форм на 1 км²) плотности распределения карстовых воронок и пещер.

Эпикарст (O_e). В связи с особой гидрогеологической и морфогенетической ролью эпикарстовой зоны в верхней части экспонированной карстующейся толщи, мы вводим оценку эпикарста в показатель «О», что отсутствует в базовой словенской схеме. Эпикарст развит почти повсеместно в пределах массива Ай-Петри, однако весьма неравномерно. Пустотность верхней части эпикарстовой зоны обычно заполнена почвенным материалом, что усиливает водоудерживающую способность эпикарста. Основными показателями эпикарста, влияющими на его защитную функцию, являются его мощность (варьирует в пределах массива от 1-2 до 20-30 м) и контрастность нижней границы. Площадная изменчивость контрастности нижней границы может

быть выявлена лишь детальными геофизическими исследованиями (георадарные методы), которые на Ай-Петри не производились, поэтому оценка эпикарста осуществляется только на основе его мощности. Оценка мощности эпикарста в области склонов массива осуществлялась по уклонам поверхности, с учетом геоморфологических и структурных элементов. В пределах плато мощность эпикарста оценивалась по распределению глубин карстовых воронок, днища которых опосредованно индицируют нижнюю границу эпикарстовой зоны. Важнейшей особенностью распределения эпикарста является наличие в нем «дыр» (в фильтрационном смысле) – днища карстовых воронок и входов вертикальных полостей, которые характеризуются нулевой защитной способностью эпикарста. Поэтому площади с очень высокой концентрацией воронок (>60 единиц на км²) были определены как участки с отсутствием эпикарста.

Результаты оценки показателя «О» выражаются в О-карте, получаемой путем сложения факторов O_s , O_L и O_e и рейтингового ранжирования площадей. Эта карта отражает степень защищенности подземных вод (рис. 6).

Концентрация поверхностного и подземного стока (С-показатель)

Карта на рис. 7 отражает распределение важнейших факторов концентрации поверхностного и подземного стока, входящих в оценку показателя «С». Сама процедура оценки детализована на рис. 8.

В базовой словенской методике, однако, определение этого показателя смещено в сторону факторов концентрации поверхностного стока и игнорируются факторы концентрации стока в зоне аэрации. В части факторов концентрации поверхностного стока были существенно модифицированы подходы к их учету и определению, что связано с отличительными особенностями Классического карста Словении и карста массивов Главной гряды Крыма. В словенском подходе детально учитываются условия инфлюационного питания путем поглощения крупным понорами стока, сформированного на смежных некарстовых площадях, что имеет огромное значение в Классическом карсте в связи с широким развитием контактных условий (переходом руслового стока с некарстовых площадей на карст) и наличием крупных польев и озер. В пределы массива Ай-Петри и большинства других массивов Горного Крыма крупные поверхностные водотоки не поступают, значительные периодические озера (связанные с характерными для польев условиями периодической кольматации приемных карстовых каналов) отсутствуют, а поглощающие поноры являются относительно небольшими и не замыкают на себя протяженные русловые системы.

Недостатком словенского подхода и его предшественников является концептуально и методически невнятный учет закарстованности. Во-первых, в схему оценки входит лишь поверхностная закарстованность, тогда как фактор закарстованности зоны аэрации игнорируется. Во-вторых, используемые для характеристики поверхностного закарстования

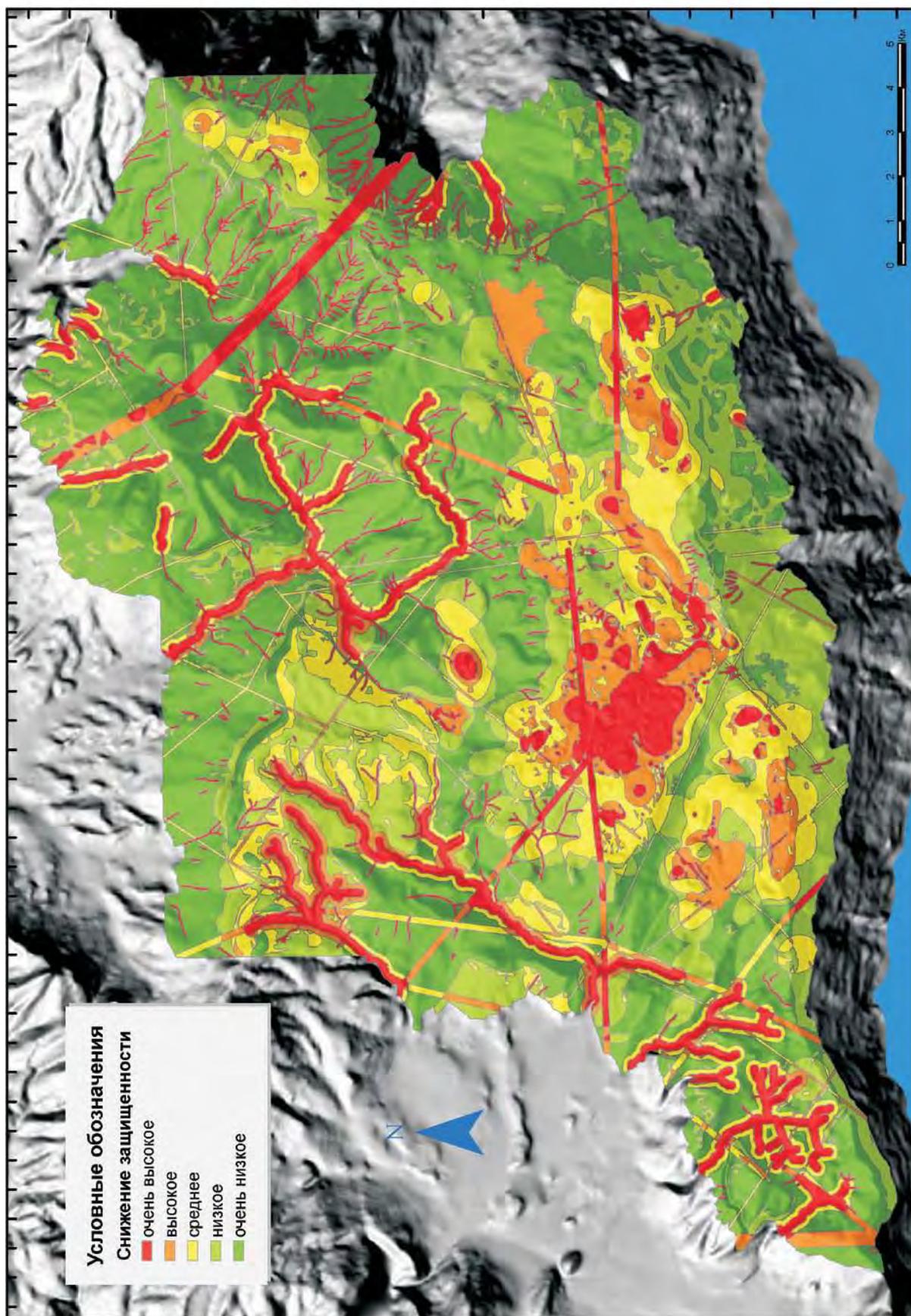


Рис. 9. Карта снижения защищенности подземных вод за счет факторов концентрации стока (С-показатель) массива Ай-Петри.

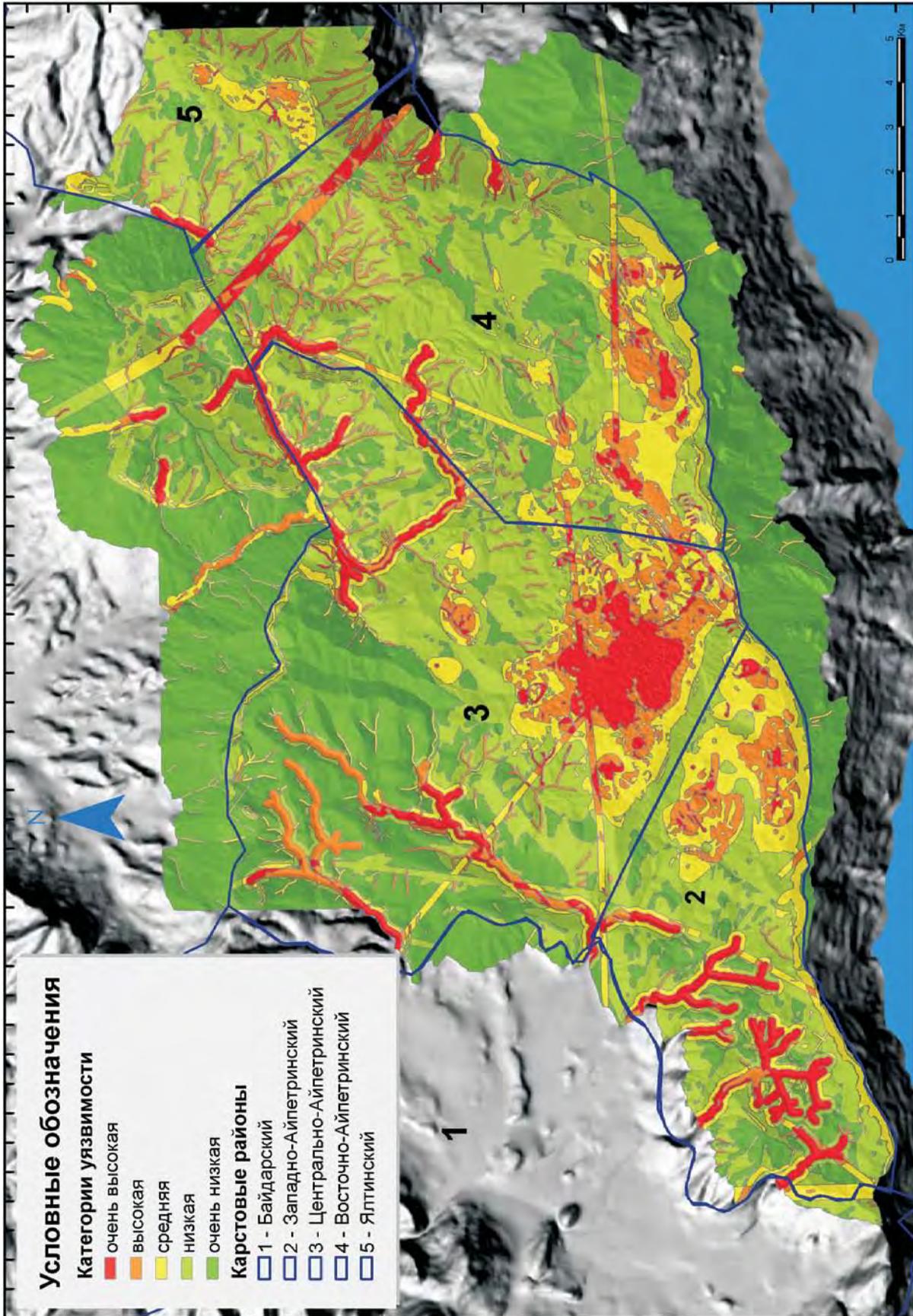


Рис. 10. Карта собственной уязвимости подземных вод массива Ай-Петри.

категории концептуально плохо определены и противоречивы. Так, в классификации выделяются категории «развитые карстовые формы», «слаборазвитые карстовые формы», «трещиноватый карст» и «отсутствие карстовых форм», картирование которых затруднительно, а роль в уязвимости подземных вод и концентрации стока неясна.

На наш взгляд, поверхностная закарстованность как фактор концентрации поверхностного стока должна учитываться по конкретным категориям форм и комплексов с учетом их гидрологической функциональности. В разработанной и реализованной модификации метода учитываются следующие факторы концентрации поверхностного стока:

- *Cd* – карстовые воронки (очаги инфильтрации);
- *Ср* – поноры (очаги инфильтрации – непосредственного поглощения периодического руслового стока);
- *Crb* – русловый сток (с подразделением на русла постоянных водотоков, тальвеги временных водотоков, и тальвеги, замыкающиеся на поноры);
- *Cсс* – замкнутые водосборы;
- *Csv* – уклоны поверхности и растительность.

Слой карстовых воронок (1565 в пределах исследуемой территории) получен на основе топокарт масштаба 1:10000 и крупномасштабных космоснимков. По этим данным построена карта плотности воронок и ранжирование площадей. Поноры выделялись по данным полевых наблюдений и посредством анализа цифровой модели рельефа с выделением точек пересечений воронок тальвегами. В оценку вводятся буферные зоны радиусом 50 м. Компоненты руслового стока и замкнутые водосборы выделялись по цифровой модели рельефа и топокартам. Карта уклонов поверхности была построена из растровой поверхности GRID рельефа массива. При построении карты растительности использовались крупномасштабные космические снимки исследуемой территории. Нововведением в данной методике является расширенная классификация растительного покрова (отдельно оцениваются участки с коренным лесом и участки с искусственными лесопосадками). Важным отличием от словенского подхода является выделение районов на нерастворимых породах, находящихся стратиграфически и топографически ниже известняков верхней юры, которые вмещают карстовые гидросистемы. Образующийся на таком покрове поверхностный сток не попадает в оцениваемый водоносный горизонт, поэтому фактор концентрации стока для нашей оценки здесь малозначим. Это учтено в низкой вариации присваиваемых индексных значений и их малом оценочном весе.

Другим отличием нашей методике является учет факторов концентрации стока в зоне аэрации, которыми являются:

- *Cf* – крупные тектонические нарушения (разломы);
- *Ccv* – карстовые полости (пещеры).

Разломы (приразломные зоны) и карстовые полости представляют собой зоны концентрированной быстрой фильтрации в трехмерном объеме зоны аэрации, обеспечивающие быстрый перевод стока и

потенциальных загрязнителей к фреатической зоне, а, следовательно, являются зонами высокой уязвимости.

При учете разломов, различные значения и размеры зон придавались разломам различного порядка (Геолого-тектоническая карта..., 2007) и простирались (на основании данных Васильева (1971), о большей гидрогеологической активности разломов простирающихся 310, 30 и 90°). Учет карстовых полостей производился по данным Кадастра пещер Украины (УИСК-УСА). Всего в пределах Ай-Петри известно свыше 500 пещер. Роль пещер в концентрации подземного стока прямо зависит от их глубины, поэтому для них был введен весовой коэффициент по этому параметру. Учитывалась также их гидрогеологическая активность (наличие или отсутствие подземных водотоков).

Карта на рис. 7. иллюстрирует данные по распределению закарстованности массива Ай-Петри (пещер и воронок – главных форм концентрации стока), использованные в оценке показателя «С».

Комплексный показатель «С» рассчитывается перемножением факторных значений *Cd*, *Ср*, *Crb*, *Cсс*, *Csv*, *Cf* и *Ccv*. Результаты оценки выражаются в С-карте, получаемой путем рейтингового ранжирования площадей (рис. 9). Она отражает степень уязвимости (снижения защищенности) подземных вод за счет факторов поверхностной и подземной концентрации стока в условиях открытого карста.

Режим осадков (Р-показатель)

Режим осадков влияет на скорость инфильтрации и движения подземных вод, а следовательно на транспорт загрязнителей к водоносному горизонту. В базовых (СОР и словенской) методиках Р-показатель отражает количество и интенсивность осадков, что оценивается по дневным суммам осадков, осредненных за период по меньшей мере 30 лет. Большое количество осадков высокой интенсивности обуславливает увеличение поверхностного стока, возрастание скорости движения подземных вод и турбулентности, транспортирующей способности по отношению к взвешенным частицам и связанным с ними микробными патогенами и химическими загрязнителями, мобилизацию плотных неводных жидких загрязнителей и т.п., т.е. увеличивает уязвимость подземных вод. В базовой методике учитываются два фактора: *Prd* - количество дней с осадками интенсивностью от 20 до 80 мм/сут. и *Pse* – количество дней с экстремальными осадками (свыше 80 мм/сут).

В масштабе массива Ай-Петри дифференциация площадей по этим факторам невозможна, поэтому оценка Р-показателя не проводилась. При распространении картирования уязвимости подземных вод на все массивы Главной гряды она будет целесообразна.

Карст зоны полного насыщения (К-показатель)

К-показатель отражает преимущественно латеральное движение подземных вод в насыщенной зоне к источникам или скважинам. Этот показатель включается в оценку и картирование уязвимости на выходе подземных вод («полной» уязвимости), которая в рамках настоящей работы не производилась.

Для такой оценки необходимы дополнительные исследования по выявлению структуры и характеристик карстовых систем в нижних гидродинамических зонах, в частности – систематические (в разные режимы водности) индикаторные исследования по определению связей выделенных зон высокой уязвимости по условиям питания с основными пунктами разгрузки и водопотребления, а также определению гидродинамических свойств водопроводящих каналов (зон).

ОЦЕНКА УЯЗВИМОСТИ РЕСУРСА ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ВЫВОДЫ

Результирующая карта собственной уязвимости подземных вод (ресурса) складывается путем умножения показателей О, С и Р и ранжирования итоговых значений, с выделением следующих классов (зон) уязвимости: 1) очень высокой; 2) высокой; 3) умеренной; 4) низкой; 5) очень низкой. Эта карта представлена на рис. 10.

Анализ полученной карты показывает, что значительная часть платообразной поверхности массива Ай-Петри относится к ареалам высокой и очень высокой уязвимости, распределение которых крайне мозаично и неравномерно. Эти ареалы сконцентрированы в Центральном-Айпетринском карстовом районе, в особенности в его южной части. К наиболее уязвимым территориям также относятся южная часть Восточно-Айпетринского карстового района (район Приайпетринской котловины) и восточная часть Западно-Айпетринского района. Эти ареалы совпадают с территориями высокой закарстованности, что снижает природную защищенность подземных вод. Основные тектонические нарушения также характеризуются высоким снижением защищенности водоносных горизонтов за счет подземной концентрации стока в зоне аэрации. Вследствие этого, приразломные зоны также относятся к ареалам высокой и очень высокой уязвимости. Очень высокой уязвимостью подземных вод характеризуются окрестности русел рек, проходящих по карстующимся породам.

К ареалам наименьшей уязвимости относятся склоновые территории на некарстующемся основании с отсутствием речной и балочной сетей. Это объясняется высокой защищенностью подземных вод данных районов за счет низких фильтрационных характеристик слагающих их пород (глин, песчаников, мергелей). Относительно низкой уязвимостью водоносных горизонтов также характеризуются пологие участки Ай-Петринского плато с низкой концентрацией либо полным отсутствием карстовых форм рельефа (поверхностных и подземных) и овражно-балочной сети. Тут в наибольшей мере проявляются защитные свойства почвы и эпикарста и не происходит снижения защищенности ресурса подземных вод за счет факторов концентрации стока.

Таким образом, результаты проведенной оценки уязвимости подземных вод массива Ай-Петри показывают, что значительная часть области питания региональной карстовой водоносной системы юго-западной части Горного Крыма относится к ареалам высокой и очень высокой уязвимости. В пределах

этих ареалов в настоящее время осуществляется интенсивное стихийное развитие рекреационной инфраструктуры и осуществляется высокая рекреационная нагрузка, что создает серьезную опасность для сохранности ресурсов подземных вод. Эта ситуация, а также существующие перспективные планы по развитию крупномасштабного курорта на массиве Ай-Петри, должны корректироваться с учетом результатов проведенного картирования.

С учетом высокой концентрации стока в зоне полного насыщения массива и очень высоких скоростей движения подземных вод можно априори заключить, что все источники и скважины, относящиеся к этой региональной гидросистеме, оказываются в категории высокой уязвимости. Для уточнения конкретных контуров питающих площадей конкретных крупных водопунктов необходимы систематические индикаторные исследования по оценке К-показателя, с составлением карты уязвимости подземных вод на выходе (полной уязвимости).

Выполненная работа является одним из первых опытов подобной оценки в условиях открытого карста, показавшим специфичность и сложность задачи. Результаты такой оценки должны служить основой территориального управления и установления адекватного режима охраны ресурсов карстовых вод в целом (включая режим в обширной области питания) и отдельных источников и водозаборов в частности.

ЛИТЕРАТУРА

- Васильев И.Н. Особенности обводнения карбонатных толщ в Крыму // Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии Украины. – М.: Недра, 1971 – Вып.3. – С.84-92.
- Геолого-тектоническая карта района Ай-Петринской яйлы и юго-западного берега Горного Крыма. Масштаб 1:100000. Составили: Фесенко А.В., Годенко Г.Е., Шаталин С.Н. – 2007.
- Глухов И.Г. Гидрогеологические признаки типов карста Горного Крыма // Новости карстологии и спелеологии. – М., 1961. – №2. – С. 17-21.
- Гольдберг В. М. Природные и техногенные факторы защищенности грунтовых вод // Бюлл. МОИП, 1983. – №2. – С. 103-110.
- Гольдберг В. М. Взаимосвязь загрязнения подземных вод и природной среды. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1987. – 248 с.
- Дублянский В.Н. Карстовые пещеры и шахты Горного Крыма. – Л.: Наука, 1977. – 180 с.
- Дублянский В.Н., Кикнадзе Т.З. Гидрогеология карста альпийской складчатой области СССР. – М: Наука, 1984. – 128 с.
- Иванов Б.Н. О типологии карстового рельефа равнин, на примере Подольско-Буковинской карстовой области. // Вопросы изучения карста на юге Европейской части СССР. – 1956. – С. 131-156.
- Климчук А.Б. Роль приповерхностной зоны карстовых массивов в гидрогеологии и морфогенезе карста. – Киев: ИГН, 1989. – 44 с.
- Климчук А.Б. Карстообразование в артезианских условиях: концепция поперечного спелеогенеза // Геол. журнал. – 2006. – № 2-3. – С.181-190.
- Климчук А.Б. Основные особенности и проблемы гидрогеологии карста: спелеогенетический подход. // Спелеология и карстология. – 2008. №1. – С. 23-46.

- Роговская Н.В. Карта естественной защищенности подземных вод от загрязнения // Природа. – 1976. – №3. – С.57-76.
- Цыкин Р.А. Карст Сибири. – Красноярск: Красноярский ун-т, 1990. – 153 с.
- Шестопалов В.М., Богуславский А.С., Бублясь В.Н. Оценка защищенности и уязвимости подземных вод с учетом зон быстрой миграции. – Киев, 2007. – 120 с.
- Шутов Ю.И. Условия формирования, гидродинамическая и гидрохимическая зональность трещинно-карстовых вод главной горной гряды Крыма. – Автореф. дис.канд.геол.-мин. наук. – Киев: КГУ, 1971. – 22 с.
- Aller L., Bennet T., Lehr J.M., Petty R.J., and Hackett G. DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. US Environmental Protection Agency, Ada, EPA/600/2-87-036. Civita and De Maio, 1987.
- Civita M., De Maio M. Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: The Italian "combined" approach. // Geofisica Internazionale. – 2004. – Vol. 43, № 4. – P. 513-532.
- 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.
- Daly D., Drew D. Irish methodologies for karst aquifer protection. // Beck B. (ed.) Hydrogeology and engineering geology of sinkholes and karst. – Rotterdam: Balkema, 1999. – P. 267–272.
- De Maio M., Civita M., Farina M., Zavatti A. Linee-guida per la redazione e l'uso delle carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. - Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (ANPA). – Roma, 2001. – №4.
- Doerfliger N., Jeannin P.-Y., Zwahlen F. Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method) // Environmental Geology. – 1999. – № 39(2). – P. 165-176.
- Drogue, C. Essai d'identification d'un type de structure de magasins carbonates fissures, Application a l'interpretation de certains aspects du fonctionnement hydrogeologique // Mem.Soc. Geol.France 1980. – № 11. – P. 101-108
- Foster S. S. D. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy // Atti Int. Conf.Vulnerab. of Soil and Groundw. to Pollutants, RIVM Proc. and Inf. 38, 1987. – P. 69-86.
- Goldscheider N., Klute M., Sturm S., Hötzl H. The PI method – a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers // Z Angew Geol, Hannover. – 2000. – № 463. – P. 157-166.
- Höltling B., Haertle T., Hohberger K. H., Nachtigall K. H., Villinger E., Weinzierl W., Wrobel J. Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasser ueberdeckung. // Geol Jahrb. – 1995, C63 – P. 5-24.
- Jeannin P.Y., Cornaton F., Zwahlen F., Perrochet P. 2001. VULK: a tool for intrinsic vulnerability assessment and validation. // 7th Conf. on limestone Hydrology and Fissured Media, Besanson, France, sept. 2001. – P. 185-190.
- Klimchouk A.B. The typology of gypsum karst according to its geological and geomorphological evolution. // Klimchouk, A., Lowe, D., Cooper, A., and Sauro, U. (eds.) Gypsum Karst of the World // International Journal of Speleology Theme issue. – 1996. – № 25 (3-4). – P. 49-60.
- Klimchouk, A.B. 2000. Speleogenesis under deep-seated and confined settings. In: A.Klimchouk, D.Ford, A.Palmer, W.Dreybrodt (eds.) Speleogenesis: Evolution of karst aquifers. – Huntsville: Natl. Speleol. Soc. – P. 244-260.
- Klimchouk, A.B. The formation of epikarst and its role in vadose speleogenesis // A.Klimchouk, D.Ford, A.Palmer, W.Dreybrodt, Eds: Speleogenesis: Evolution of karst aquifers. Huntsville: Natl. Speleol. Soc., 2000. – P. 91-99.
- Klimchouk A.B. Conceptualisation of speleogenesis in multy-storey artesian systems: a model of transverse speleogenesis // Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers 1 (2). – 2003 www.speleogenesis.info, 18 pages.
- Klimchouk A.B. Towards defining, delimiting and classifying epikarst: Its origin, processes and variants of geomorphic evolution. // Jones, W.K., Culver, D.C. and Herman, J. (eds.) Epikarst // Proc. of the symposium, Sheperdstown, West Virginia, USA. Karst Water Institute special publication 9, 2004. – pp. 23-35.
- Klimchouk A. Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and Morphogenetic Perspective // NCKRI Special Report 1. – Carlsbad, New Mexico, 2007. – 106 pp.
- Klimchouk, A.B., Gudzenko, V.V. Chernobyl radiocaesium in a karst system, Marble Cave, Crimea. // Environmental Geology. – 1996. – 28 (3). – P. 161-166.
- Klimchouk A.B., Ford D.C. Types of karst and evolution of hydrogeologic settings // A.Klimchouk, D.Ford, A.Palmer, W.Dreybrodt (eds.): Speleogenesis: Evolution of karst aquifers. – Huntsville: Natl. Speleol. Soc., 2000. – P. 45-53.
- Margat J. Vulnerabilite des nappes d'eau souterraine a la pollution // BRGM Publication 68 SGL 198 HYD, Orleans. – 1968.
- Quinlan J.F. Types of karst, with emphasis on cover beds in their classification and development // PhD Thesis, Univ. of Texas at Austin. – 1978.
- Ravbar N. The protection of karst waters. – Postojna-Ljubljana, 2007. – 254 pp.
- Ravbar N., Goldscheider N. Integrating temporal hydrologic variations into karst groundwater vulnerability mapping – exemples from Slovenia. // 8 Conf. on limestone Hydrogeology, Neushatel, 2006. – P. 229-233.
- Vrba J., Zaporozec A. (Eds.). Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability // International Contributions to Hydrogeology, International Association of Hydrogeology, Heise, Hanover, 1994. – v. 16.– 131 pp.
- Williams P.W. The role of the subcutaneous zone in karst hydrology // Journal of Hydrology, 1983. – № 61. – P. 45-67.
- Worthington S.R.H., Ford, D.C., Beddows, P. Porosity and Permeability enhancement in unconfined carbonate aquifers as a result of solution. // A.Klimchouk, D.Ford, A.Palmer, W.Dreybrodt (eds.) Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers. – Huntsville: Natl. Speleol. Soc., 2000. – P. 423-432.
- Zaporozec A. (Ed.). Groundwater Contamination Inventory // IHP-VI, Series on groundwater, UNESCO. – №2, 2002.
- Zwahlen F. (Ed.). Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers // Final report COST Action 620, European Commission, Directorate. –Luxemburg, 2004. – 315 pp.