

**А.Б. Климчук, С.В. Токарев****Рекомендации по охране подземных источников питьевого водоснабжения в карстовых регионах**

Климчук А.Б., Токарев С.В. Рекомендации по охране подземных источников питьевого водоснабжения в карстовых регионах // Спелеология и карстология. – № 12. – Симферополь. – 2014. – С. 5-16.

Карстовые водообменные системы характеризуются рядом специфических особенностей, обуславливающих их высокую чувствительность к загрязнению. Несмотря на значительную долю карстовых подземных вод в структуре водоснабжения отдельных регионов Украины, существующие нормативные документы по охране подземных вод не учитывают особенности карстовых водообменных систем. В статье обосновывается необходимость применения специального подхода к организации охраны ресурсов подземных вод в карстовых районах. Его ключевыми особенностями являются 1) выполнение специальной (адаптированной к условиям карста) оценки уязвимости подземных вод к загрязнениям во всей области питания и 2) установление зон охраны водозаборов из подземных источников по принципу не поясной, а дискретной конфигурации, в соответствии с реальным распределением зон высокой уязвимости и направлений и скоростей движения карстовых вод. Статья иллюстрируется примерами проблемных ситуаций и рекомендаций по их разрешению для условий экспонированного карста Горного Крыма, в частности - Ай-Петринского массива в его юго-западной части.

Ключевые слова: карстовая водообменная система, уязвимость подземных вод, зона санитарной охраны, водозабор, Горный Крым.

Климчук О.Б., Токарев С.В. Рекомендації з охорони підземних джерел питного водопостачання у карстових регіонах // Спелеологія і карстологія. – № 12. – Симферополь. - 2014. – С. 5-16.

Карстові водообмінні системи характеризуються низкою специфічних особливостей, які обумовлюють їх високу чутливість до забруднень. Незважаючи на значну частку карстових підземних вод в структурі водопостачання окремих регіонів України, існуючі нормативні документи з охорони підземних вод не враховують особливостей карстових водообмінних систем. У статті обґрунтовується необхідність застосування спеціального підходу до організації охорони ресурсів підземних вод в карстових районах. Його ключовими особливостями є 1) виконання спеціальної (адаптованої до умов карсту) оцінки уразливості підземних вод до забруднень по всій області живлення і 2) встановлення зон охорони водозаборів з підземних джерел згідно з принципом не поясної, а дискретної конфігурації, відповідно до реального розподілу зон високої уразливості і напрямків і швидкостей руху карстових вод. Стаття ілюструється прикладами проблемних ситуацій і рекомендацій по їх вирішенню для умов експонованого карсту Гірського Криму, зокрема - Ай-Петрінського масиву в його південно-західній частині.

Ключові слова: карстова водообмінна система, уразливість підземних вод, зона санітарної охорони, водозабір, Гірський Крим.

Klimchouk A.B., Tokarev S.V. Recommendations on groundwater source protection for drinking water supply in karst regions // Speleology and Karstology. - № 12. - Simferopol. - 2014. – P. 5-16.

Karst aquifers are characterized by a number of specific features which define their high vulnerability to contaminations. Despite of the fact that karst aquifers play a significant role in water supply of some regions in Ukraine, acting normative documents for groundwater protection do not take into account the specific properties of karst aquifers. The necessity of a special approach to organize protection of groundwater resources and intakes in karst regions is grounded in the article. The key features of this approach are: 1) application of a special (adapted to karst conditions) assessment of groundwater vulnerability to contaminations for the whole recharge area, 2) delineation of the protection zones for groundwater sources according to concept of discrete configuration, not of belt zoning, based on actual allocation of highly vulnerable zones and distribution of directions and velocities of karst groundwater flow. The article gives examples of problematic situations and recommendations to solve them for exposed karst areas in the south-western part of the Mountainous Crimea (Ay-Petri massif).

Keywords: karst aquifer, groundwater vulnerability, protection zone, water abstraction, Mountainous Crimea.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время резко возрастает актуальность проблемы обеспечения населения Украины качественной питьевой водой, что стало одним из важнейших факторов устойчивого развития, а в перспективе может стать одним из критичных факторов 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 осязаемое возрастание социального напряжения, снижение привлекательности региона для туристов и другие негативные социально-экономические и экологические последствия.

Эффективное и безопасное использование водных ресурсов в современных цивилизационных условиях невозможно без системы научно обоснованных мер, направленных на сохранение их количества и качества. Научное обоснование должно опираться на данные фундаментальных, региональных и локальных исследований в области гидрологии, гидрогеологии и сопутствующих им отраслей знаний. Применительно к подземным водам, оно должно раскрывать и учитывать специфику водообменных геосистем различных типов и особенности региональных и местных гидрогеологических условий.

Среди водообменных геосистем ярко выраженной спецификой отличаются карстовые, развитые в растворимых породах. Значение подземных вод карстовых водообменных систем (КВС) для питьевого водоснабжения в Украине весьма велико, поскольку около 67 % территории страны подстилаются растворимыми породами (Дублянская, Дублянский, 1992). С закарстованными породами связаны наиболее обильные подземные водоносные комплексы, содержащие воды высокого питьевого качества. Вместе с тем, в условиях экспонирования карстующихся пород на поверхность, подземные воды в них характеризуются высокой собственной уязвимостью, что требует особых подходов к охране ресурсов и водозаборов. Наиболее крупным регионом экспонированного карста в Украине является Главная гряда Крымских гор, играющая ключевую роль в формировании ресурсов подземных вод южной части крымского полуострова – его самой населенной и социально и экономически значимой части.

Применительно к подземным источникам водоснабжения, - водозаборах из источников, скважин и колодцев, особое значение среди водоохраных мер имеет установление зон санитарной охраны (ЗСО) с назначением для них специального режима использования. Определение границ ЗСО источников водоснабжения и назначение их режима регулируется соответствующими законодательными актами, принятыми на государственном уровне.

Хотя существующие нормативные документы предусматривают, что определение границ ЗСО и разработка комплекса необходимых санитарных мероприятий должны осуществляться с учетом

степени естественной защищенности источников водоснабжения и особенностей гидрогеологических и гидрологических условий (Положение о порядке проектирования..., 1998), на практике эти важнейшие условия далеко не всегда учитываются. Особенно ярко несоответствие существующих подходов и практики установления ЗСО реальным гидрогеологическим условиям проявляются в карстовых районах. Предписанные нормативными документами подходы к установлению ЗСО оказываются в условиях карста нереалистичными, а практика состоит в применении в гидрогеологических расчетах допущений и параметров, не соответствующих реальным характеристикам водообменных систем карстовых районов. Результатом этих противоречий является практическое отсутствие у большинства водозаборов в карстовых районах санитарной охраны в реальных областях питания вод.

Целью данной работы является анализ проблемы охраны ресурсов подземных вод и источников водоснабжения в районах развития экспонированного карста и определение путей её решения. Для иллюстрации сути и остроты проблемы используется регион юго-западного Крыма, где основой водоснабжения являются подземные воды, формирующиеся в верхнеюрских известняках горного массива Ай-Петри.

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОГЕОЛОГИИ РАЙОНОВ ЭКСПОНИРОВАННОГО КАРСТА

Решения большинства миграционных задач гидрогеологии основаны на концепции условно-сплошной среды с непрерывными свойствами, т.е. на рассмотрении движения жидкости в некоем достаточно большом объеме породы, чтобы можно было пренебречь размерами, формой и расположением отдельных водовмещающих элементов. Распределение пустотности обычно принимается беспорядочным, параметры пустотности и проницаемости усредняются в пределах некоего опробованного объема пласта на основе экспериментальных данных (скважинных, геофизических и лабораторных) и расчетов.

Гидрогеология закарстованных территорий характеризуется ярко выраженной спецификой (Дублянский, Кикнадзе, 1984; Климчук, 2008; Ford, Williams, 1989), делающей упомянутые допущения неприменимыми для большинства практических задач. Главным отличием карстовых коллекторов от обычных (в некарстующихся породах) является то, что их емкостные и фильтрационные свойства отличаются закономерной крайне высокой пространственной неоднородностью и анизотропией, формирующейся в результате саморазвития и самоорганизации структур каналовой проницаемости (спелеогенеза) (Климчук, 2008; Климчук, 2011). Карстовые коллекторы характеризуются *многоуровневой проницаемостью*, уровни которой соответствуют элементарным водовмещающим средам различной природы, структуры и размеров: поровой, трещинной и каналовой. Наличие интегрированных и организованных систем каналов является важнейшей системообразующей характеристикой КВС, определяющей гидродинамику подземных вод карстовых районов. Несмотря на

небольшую долю карстовых каналов в общем объеме пустотности растворимых пород (обычно в пределах 0,05 – 3 %), они проводят 94 – 99 % подземного стока (Worthington et al, 2000). Скорости движения подземных вод в карстовых каналах на 3-7 порядков выше, чем в некарстовых водоносных системах зоны интенсивного водообмена, обычно составляя сотни и тысячи метров в сутки. По результатам 35 экспериментов по трассированию карстовых вод, проведенного в разные годы в Горном Крыму, средняя скорость их движения составляет 3350 м/сут (140 м/час; 0,04 м/с), причем эту оценку можно считать заниженной, поскольку регистрация времени прихода трассеров в пункты наблюдений в большинстве экспериментов была малодискретной, а эксперименты проводились не в периоды высокой обводненности. При доле карстовых территорий в 15 – 25 % от площади крупных регионов, расход карстовых источников составляет 70 – 80 % от совокупного расхода всех источников (Sanz Pérez, 1996), что определяет их важность для водоснабжения.

Гидродинамическая зональность (рис. 1), условия питания и структура подземного стока (рис. 2) карстовых гидрогеологических массивов намного более сложны, чем в некарстовых районах. В вертикальной структуре экспонированных карстовых массивов, кроме зон аэрации (вадозной зоны) и насыщения (фреатической зоны) также выделяют эпикарстовую зону и эпифреатическую зону, а внутри зоны насыщения разделяют зоны интенсивного и замедленного водообмена (рис. 1).

Эпикарстовая зона является специфической для экспонированных карстовых массивов, отличается

от нижележащих зон более высокой и равномерно распределенной пустотностью и проницаемостью, и играет важную роль в питании карстовых вод и регулировании стока в массивах (Климчук 2009). Она обладает большой гравитационной емкостью, содержит значительные динамические запасы вод, распределяет преимущественно рассеянное инфильтрационное питание на различные компоненты стока в зоне аэрации, обеспечивает существенную задержку сквозного прохождения вод и загрязнителей к фреатической зоне и основным источникам. Тем самым эпикарстовая зона выполняет функцию буфера по отношению к основному водоносному горизонту массива, оказывает выраженное влияние на режим основных карстовых источников и является важным фактором повышения естественной защищенности подземных вод карстовых массивов.

Вместе с тем, наряду с рассеянной инфильтрацией через эпикарст, большую роль в питании карстовых массивов играют концентрированные механизмы питания: инфлюация и очаговая инфильтрация. Питание, поступающее в массив этими способами, минует эпикарстовую зону и непосредственно формирует шахтный сток, - наиболее динамичный компонент подземного стока в карстовом массиве. Поэтому наличие участков инфлюации и очаговой инфильтрации в области питания является наиболее существенным фактором уязвимости карстовых вод.

Неравномерность и дискретность распределения условий питания по площади, развитие локализованных и интегрированных каналов систем, способных проводить подземный сток (и, соответственно,

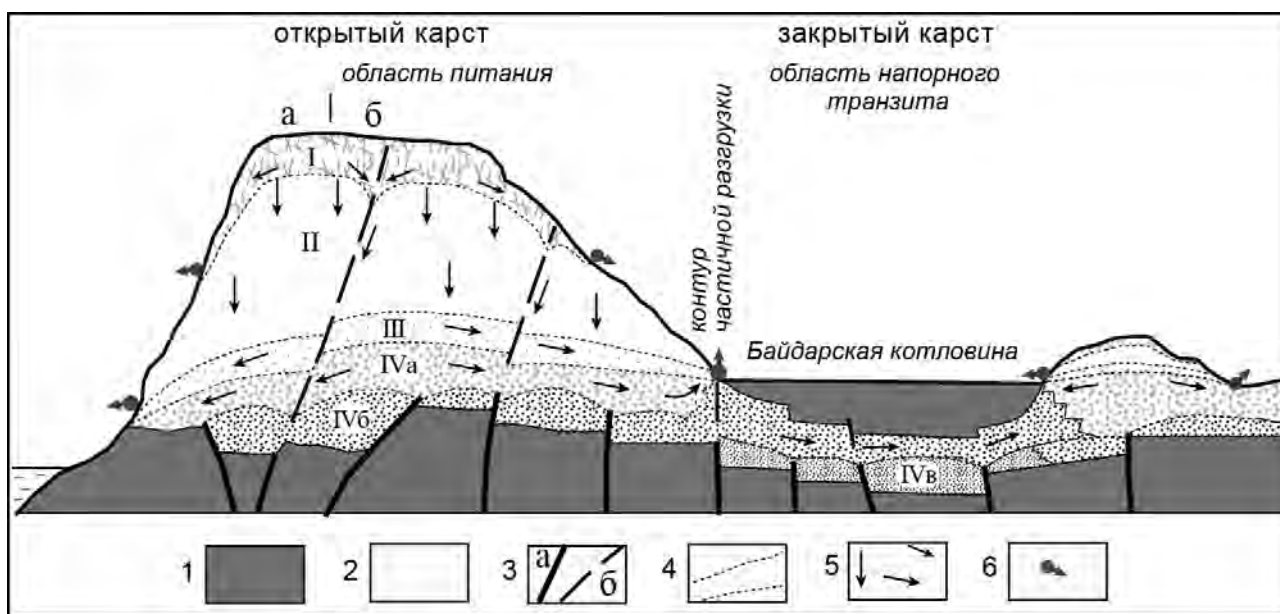


Рис. 1. Схема гидродинамической зональности карстовых вод на примере юго-западной Горного Крыма (на основе схем И.Г. Глухова (1961), Ю.И. Шутова (1971) и В.Н. Дублянского (1977), с дополнениями и изменениями А.Б.Климчука (2009)). Карстовые массивы: а – цокольные приморские, б – склоновые континентальные. 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 во времени 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); IVб - напорных вод с интенсивным водообменом; IVв – напорных вод закрытого карста с замедленным водообменом. Условные обозначения: 1 – слабопроницаемые породы, 2 – карстующиеся породы, 3 – тектонические нарушения: 3а - в коколе, 3б – в карстующихся породах, 4 – границы гидродинамических зон, 5 – направления движения подземных вод, 6 – карстовые источники.

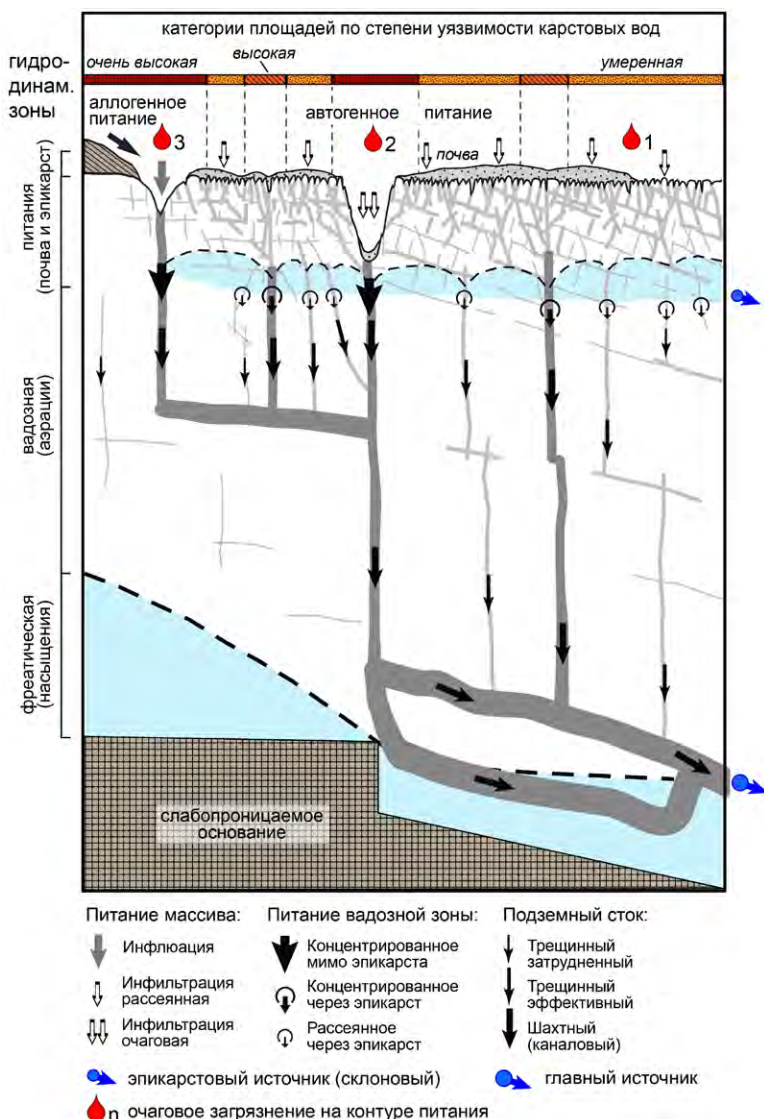


Рис. 2. Концептуальная модель питания и структуры подземного стока и распределение площадных категорий уязвимости карстовых вод (полоса сверху) в экспонированном карстовом массиве (по А.Б. Климчику (2009), с дополнениями). Размеры стрелок, показывающих элементы питания и структуры стока, примерно отражают соотношение их объемов и скоростей движения вод. Время сквозного прохождения загрязнителей, введенных в различных условиях питания (точки 1-3), примерно соотносится как $t_3 < t_2 \ll t_1$.

загрязнения при их попадании в водоносную систему) на большие расстояния с очень высокими скоростями, определяют высокую уязвимость ресурсов подземных вод, их крайне низкую, по сравнению с некарстовыми коллекторами, способность к самоочищению и рассеиванию загрязняющих веществ, и специфику проблемы охраны источников подземного питьевого водоснабжения в районах экспонированного карста.

ПРОБЛЕМЫ ТРАДИЦИОННОЙ МЕТОДОЛОГИИ ОХРАНЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ВОДОЗАБОРОВ В ПРИЛОЖЕНИИ К КАРСТОВЫМ РАЙОНАМ

Охрана водозаборов осуществляется посредством установления ЗСО, в пределах которых устанавливается особый санитарно-

эпидемиологический режим с целью предотвращения ухудшения качества воды источников централизованного хозяйственно-питьевого назначения и обеспечения охраны водопроводных сооружений (Водный кодекс Украины, 1995). ЗСО разделяются на пояса особого режима. Границы ЗСО водных объектов (водозаборов) устанавливаются местными Советами на их территории по согласованию с государственными органами санитарного контроля, охраны окружающей природной среды, водного хозяйства и геологии. Режим ЗСО водных объектов устанавливается Кабинетом Министров Украины. Более детальные рекомендации по определению границ поясов ЗСО и их режиму даны в двух документах: СанПиН №2640-82 «Положения о порядке проектирования и эксплуатации зон санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов хозяйственно-питьевого назначения» от 18.12.82 (Положение о порядке проектирования..., 1998) и СНиП 11-31-74 «Нормы проектирования. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения» (Водоснабжение, 1976)

Согласно упомянутым документам, ЗСО организуется в составе трех поясов: первый пояс (строгого режима) включает территорию расположения водозаборов, площадок расположения всех водопроводных сооружений и водоподводящего канала; второй и третий пояса (пояса ограничений) включают территорию, предназначенную для охраны от загрязнения источников водоснабжения. В каждом из трех поясов, соответственно их назначению, устанавливается специальный режим и определяется комплекс мероприятий, исключающих возможность ухудшения качества воды. Определение границ ЗСО и разработка комплекса необходимых санитарных мероприятий осуществляются с учетом вида источников водоснабжения (подземных или поверхностных), степени их естественной защищенности и возможности микробного или химического загрязнения, особенностей санитарных, гидрогеологических и гидрологических условий, а также характера загрязняющих веществ. Проектирование ЗСО должно начинаться с выполнения санитарных, микробиологических, санитарно-химических, гидрогеологических и гидрологических изысканий.

Граница первого пояса ЗСО для водозаборов подземных вод устанавливается на расстоянии не менее 30 м от водозабора - при использовании защищенных подземных вод, и на расстоянии не менее 50 м - при использовании недостаточно защищенных подземных вод. К защищенным подземным водам относятся напорные и безнапорные межпластовые

воды, имеющие в пределах всех поясов ЗСО сплошную водоупорную кровлю, исключаящую возможность местного питания из вышележащих недостаточно защищенных водоносных горизонтов. К недостаточно защищенным подземным водам относятся грунтовые воды и межпластовые воды, которые получают питание на площади ЗСО из вышележащих недостаточно защищенных водоносных горизонтов через гидрогеологические окна или проницаемые породы кровли, а также из водотоков и водоемов путем непосредственной гидравлической связи (СанПиН №2640-82). Отметим, что условия экспонированного карста всегда соответствуют упомянутым критериям недостаточно защищенных подземных вод, однако в любом случае расширение границы первого пояса до 50 м никоим образом не может усиливать защищенность подземных вод и водозаборов в пределах остальных поясов.

Границы второго и третьего поясов ЗСО подземных и поверхностных источников водоснабжения определяются гидродинамическими расчетами, основанными на учете (1) санитарных, гидрологических и гидрогеологических особенностей источников водоснабжения; (2) различия микробных и химических загрязнений по степени их стабильности в воде подземных и поверхностных источников водоснабжения (Рекомендациях по гидрогеологическим расчетам ..., 1983).

Граница второго пояса ЗСО определяется исходя из условия, что если за ее пределами в водоносный горизонт поступят микробные (нестабильные) загрязнения, то они не достигнут водозабора. Основным параметром, определяющим расстояние от границы второго пояса ЗСО до водозабора, является расчетное время T_m продвижения микробного загрязнения с потоком подземных вод к водозабору, которое должно быть достаточным для утраты жизнеспособности и вирулентности патогенных микроорганизмов, т.е. эффективного самоочищения. В климатических условиях Украины расчетное время T_m принимается равным 400 сут. для грунтовых вод и 200 сут. для горизонтов межпластовых вод.

Граница третьего пояса ЗСО определяется исходя из условия, что если за ее пределами в водоносный горизонт поступят химические (стабильные) загрязнения, они или не достигнут водозабора, перемещаясь с подземными водами вне области питания, или достигнут водозабора, но не

ранее времени T_x (проектного срока эксплуатации водозабора – обычно не менее 25 лет).

В странах ЕС национальная нормативно-правовая база, регулирующая охрану и использование водных ресурсов (включая правила установления охранных зон водозаборов), приведена в соответствии с Директивой Сообщества от 2000 г. (Directive 2000/60), определяющей понятия, принципы и общие требования в этой области. В большинстве стран, имеющих значительную долю закарстованных территорий, в нормативные документы введена дифференциация подходов к охране подземных вод и водозаборов в коллекторах порового/гранулярного и карстового типов, а к трещинным коллекторам применяется тот из них, который наиболее соответствует их индивидуальным гидродинамическим особенностям (степени выраженности свойств сплошной или дискретной сред). Для порово-гранулярных коллекторов, подход в целом сходен с принятым в Украине (т.е., поясная организация и определение границ зон основаны на изохронах расчетного времени миграции), но отличаются номенклатура и охранные режимы зон, а также величины расчетного времени T для определения их границ. Типичным и показательным является законодательные нормы Словении, где около 95 % питьевого водоснабжения основано на подземных источниках (Brenčić et al, 2009). Для водозаборов порово-гранулярного типа устанавливается закрытая зона собственно водозабора (в радиусе 10 м для скважин и не менее 20 м для источников) для непосредственной защиты оборудования и ввода в распределительные системы, и три собственно охранных зоны – внутренняя, средняя и внешняя (рис. 3, Б). Режимы и критерии выделения зон следующие:

- Внутренняя зона - очень жесткие ограничения; целевое назначение зоны сходно с таковым для второго пояса ЗСО в Украине, но границы устанавливаются по изохроне времени миграции 50 сут (а не 400 или 200 сут, как для этого пояса в Украине).
- Средняя зона – жесткие ограничения; целевое назначение зоны сходно с таковым для третьего пояса ЗСО в Украине, но границы устанавливаются по изохроне времени миграции 400 сут (а не 25 лет, как для этого пояса в Украине).
- Внешняя зона – умеренные ограничения; зона охватывает всю область питания водоносного горизонта или комплекса.

Одним из ключевых недостатков нормативных документов в Украине, определяющих принципы установления охранных зон водозаборов, является

отсутствие дифференциации по типам водовмещающих сред систем подземных вод. Подход к определению границ поясов ЗСО по изохронам времени миграции (рис. 3) и используемые для этого параметрические уравнения основаны на допущении о сплошности фильтрационной среды и пригодны для коллекторов порового и гранулярного типа, в которых поток подземных вод описывается законом Дарси. Распределение скоростей

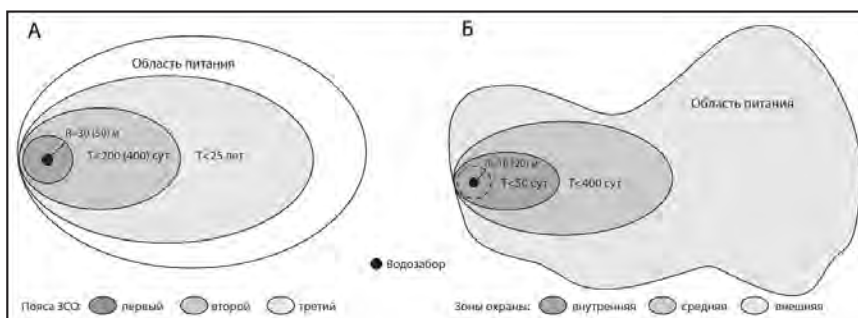


Рис. 3. Схема определения границ поясов ЗСО для водозаборов подземных вод согласно нормативной базе Украины (А) и Словении (Б) для поровых/гранулярных коллекторов (Б – по Brenčić et al, 2009).

фильтрации, редко превышающих 10 м/сут в таких коллекторах, относительно равномерно, время сквозного прохождения подземных вод увеличивается (а риск поступления с ними загрязнения уменьшается) прямо пропорционально расстоянию от участков инфильтрации в области питания до водозабора. Однако этот подход является неадекватным в условиях карстовых водообменных систем, в которых, как показано выше, доминируют структуры каналовой проницаемости, наблюдаются крайне высокие концентрация и локализация подземного стока, скорости движения вод в каналах на несколько порядков превышают таковые в коллекторах других типов, распределение каналов крайне неравномерно, а ресурсы подземных вод отличаются высокой уязвимостью по условиям питания. Неприменимость традиционного (нормативного) подхода в этих условиях можно проиллюстрировать рассмотрением двух аспектов: скорости движения подземных вод и конфигурации ЗСО.

Скорость движения подземных вод. При типичных для хорошо проницаемых нерастворимых пород действительных скоростях движения подземных вод 5-10 м/сут, граница второго пояса ЗСО вверх по потоку подземных вод должна быть установлена на расстоянии 2-4 км от водозабора ($T_m=400$ сут) или 1-2 км ($T_m=200$ сут). При использовании предписанных норм для карстового коллектора, где типичная скорость движения карстовых вод составляет около 2000 м/сут (по данным 8000 трассерных экспериментов) (Worthington, Ford, 2009) границу второго пояса ЗСО следует устанавливать на расстояниях 800 км ($T_m=400$ сут) или 400 км ($T_m=200$ сут) от водозабора. При средней скорости движения карстовых вод в Горном Крыму в 3350 м/сут, эту границу должна быть установлена на расстояниях в 1340 км или 670 км, что выходит далеко за пределы не только распространения водоносного комплекса, но и границ Крыма для любого из водозаборов, использующих воды верхнеюрских отложений Главной гряды.

Конфигурация ЗСО. В традиционном подходе принята поясная конфигурация площадей различных охранных режимов относительно водозабора (источника или скважины), с установлением границ поясов по изохронам времени миграции и градацией режимов прямо пропорционально расстоянию от водозабора. Эта конфигурация исходит из допущения, что время движения потока подземных вод (и загрязнителя) возрастает прямо пропорционально расстоянию от участков инфильтрации в области питания до водозабора. Однако в условиях экспонированного карста распределение участков инфильтрации и очаговой инфильтрации дискретно по площади области питания, а их прямая связь с каналами может обеспечивать намного более быстрое поступление загрязнителей к водозабору от удаленных участков, чем от участков рассеянной инфильтрации в ближней к водозабору зоне. Эта особенность иллюстрируется на рис. 2, где время сквозного прохождения загрязнений, введенных в точках 3 и 2, является меньшим, чем время прохождения загрязнения от точки 1 вблизи источника. Таким образом, поясная конфигурация ЗСО в таких условиях не имеет смысла.

Для карстовых коллекторов, нормативные документы многих стран ЕС предписывают особый подход к установлению охранных зон водозаборов, учитывающий рассмотренные в разделе 1 особенности гидрогеологии карста и основанный на специальной (адаптированной к условиям карста) методологии оценки уязвимости подземных вод.

ОСОБЕННОСТИ ОХРАНЫ РЕСУРСОВ И ВОДОЗАБОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В УСЛОВИЯХ ЭКСПОНИРОВАННОГО КАРСТА

Приведенная выше аргументация делает очевидными необоснованность и нереалистичность существующих и предписываемых нормативными документами подходов и требований к охране ресурсов и установлению охранных зон водозаборов подземных вод в условиях экспонированного карста, что обуславливает необходимость разработки и внедрения в практику специальных методологических подходов к этим вопросам.

Научной основой охраны ресурсов подземных вод является методология оценки их защищенности (Гольдберг, 1983, 1987; Роговская, 1976) или уязвимости (Margat, 1968; Vrba, Zaporozec, 1994), – характеристик, имеющих одинаковый смысл, но обратные значения. Под уязвимостью системы подземных вод понимается ее чувствительность к загрязнениям, характеризуемая степенью развития комплексной барьерной функции верхней части геологической среды, определяемая развитостью физических (проницаемость, дисперсивность) и геохимических (сорбция) барьеров (Vrba, Zaporozec, 1994; Шестопалов и др., 2007). Площадные (региональные и локальные) картографические оценки уязвимости подземных вод являются обязательной основой природо(ресурсо)охранного регулирования хозяйственной деятельности в странах ЕС, США и многих других странах. Опыт реализации оценки уязвимости/защищенности подземных вод в Украине ограничен (см. недавний обзор и пример для части бассейна Днепра в работе Шестопалова с соавторами (Шестопалов и др., 2007)), а ее осуществление не предписывается нормативно-правовыми документами и не внедрено в природоохранную (водоохранную) практику.

В течение последних десятилетий за рубежом разработаны и внедрены в практику (во многих странах – на уровне нормативных требований) специфические методы оценки и картирования уязвимости подземных вод в карстовых регионах, учитывающие рассмотренные выше особенности их гидрогеологии. В результате европейской программы COST Action 620 (1996-2004 гг.) был разработан так называемый Европейский подход к оценке уязвимости подземных вод в условиях карста (Zwahlen, 2004), представляющий собой методологическую основу для разработки конкретных региональных подходов-методик. Степень собственной (независимой от характера загрязнений) уязвимости определяется тремя группами факторов: 1) защищенностью горизонта подземных вод свойствами перекрывающих слоев (включая зону аэрации водовмещающей толщи);

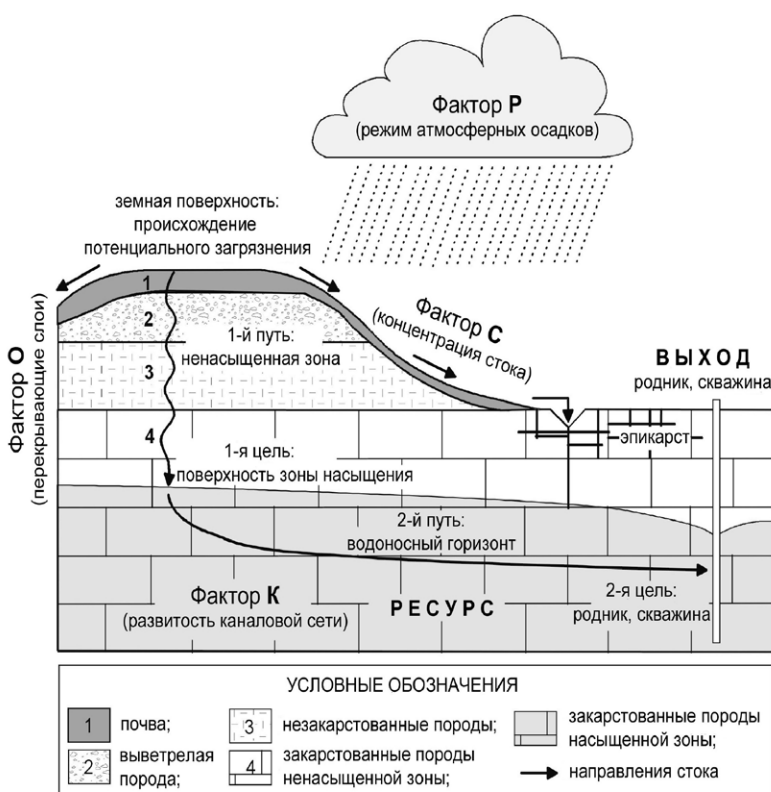


Рис. 4. Концептуальная модель распространения загрязнений в системе «происхождение – путь – выход» и факторов уязвимости ресурса и выхода согласно Европейскому подходу (по Zwahlen, 2004).

2) снижением защищенности в связи с концентрацией питания и подземного стока и обхода ими защитных слоев; 3) климатическими и ландшафтными условиями питания подземных вод, определяющими количество и режим атмосферных осадков и питания.

Оценка уязвимости основывается на концепции «происхождение-путь-выход» (рис. 4). Уязвимость может оцениваться по защитным свойствам покровной толщи и зоны аэрации на пути от источника загрязнения до оцениваемого горизонта, куда инфильтрируется загрязненная поверхностная вода (путь 1 от точки внедрения загрязнителя до 1-й цели на рис. 4 – *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 (пути 1 и 2 до 2-й цели на рис. 4 – *уязвимость на выходе*). Подчеркнем снова, что в условиях карста путь 2 (латеральный транзит в водонасыщенной зоне) характеризуется не фильтрацией в сплошной среде, а локализованным движением карстовых вод по каналам с огромной водопроницаемостью, что требует выявления структуры канальных систем и динамических характеристик локализованных потоков в области транзита при оценке уязвимости на выходе.

Нетрудно заметить, что понятие «уязвимости на выходе» соответствует понятию уязвимости водозабора подземных вод и индивидуализируется для каждого водозабора. Это обстоятельство, наряду с рассмотренными выше особенностями гидрогеологии

карста, приводит к следующим важнейшим практическим выводам:

1. Уязвимость водозаборов в условиях карста критически зависит от степени их связи с каналовыми системами и через них – с локальными участками снижения защищенности, распределенными дискретно по области питания. Водозаборы на карстовых источниках практически всегда прямо связаны с каналовыми системами.

2. Дифференциация площадей и установление границ различных охранных режимов водозаборов в районах экспонированного карста должны основываться на полной оценке уязвимости карстовых вод, включающей оценку уязвимости ресурса (площадную оценку по всей области питания) и оценку уязвимости на выходе (конкретного водозабора). Соответственно, распределение площадей (зон) различных режимов водозаборов должно иметь не поясной характер, а прямо отражать степень уязвимости, т.е. они могут иметь дискретное распределение по области питания (рис. 5).

3. При установлении методами трассирования гидравлической связи индивидуальных водозаборов с конкретными участками высокой уязвимости в области питания и времени добега от них трассера (потенциального загрязнителя) ниже установленного порогового значения,

такие участки должны определяться как зоны строгого режима, соответствующего первому поясу существующих нормативных документов. В случае недостаточности данных о гидравлической связи индивидуальных водозаборов с конкретными участками высокой уязвимости в области питания, все такие участки должны рассматриваться как зоны ограничений, соответствующих второму поясу существующих нормативных документов.

Забор карстовых вод может осуществляться различными способами: (1) скважинами и колодцами,

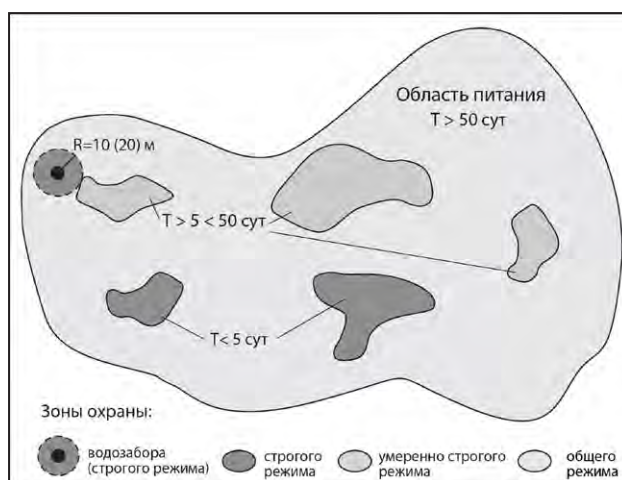


Рис. 5. Рекомендуемые принципы и критерии установления границ зон охраны для водозаборов карстовых вод.

(2) каптажными устройствами на карстовых источниках, (3) из рек и (4) водохранилищ, имеющих карстовое питание (рис. 6). Нормативные документы предписывают разные требования к определению границ поясов ЗСО для водозаборов из поверхностных и подземных источников, что обусловлено различиями в условиях формирования этих компонентов стока, степени их защищенности и особенностях миграции загрязнений в них. Подземные воды некарстовых коллекторов часто питают поверхностные воды в пределах ЗСО водозаборов, но, во-первых, такое питание является обычно рассеянным, во-вторых, подземные воды формируются в пределах тех же водосборов, в третьих, они априори считаются намного более защищенными. Поэтому специальных требований к охране подземных вод в связи с поверхностным водоотбором не предъявляется.

В карстовых регионах питание поверхностных водоемов подземными водами является обычно локализованным и часто играет основную роль в формировании стока. Поверхностные водотоки полностью или в значительной степени питаются концентрированной разгрузкой карстовых

водообменных систем, в которых динамические свойства локализованных подземных потоков могут быть весьма сходными с таковыми поверхностных водотоков, области питания могут распространяться далеко за пределы поверхностных водосборов, а способность к самоочищению является крайне низкой. Кроме того, участки подземного и поверхностного течения водотоков могут перемежаться. В случаях, когда водозабор осуществляется из поверхностного водотока или водоема со значительной долей карстового питания, а питающие источники подземных вод находятся в пределах границ второго пояса (по нормам для водозаборов из поверхностных источников), то необходима организация ЗСО и для карстовых источников. По нормам определения границ ЗСО для водозаборов из поверхностных источников, граница второго пояса устанавливается вверх по течению по времени пробега по основному водотоку и его притоку не менее 5 суток. К примеру, в юго-западной части Горного Крыма большинство водозаборов из поверхностных источников имеют преобладающее питание из карстовых источников в пределах этих границ.

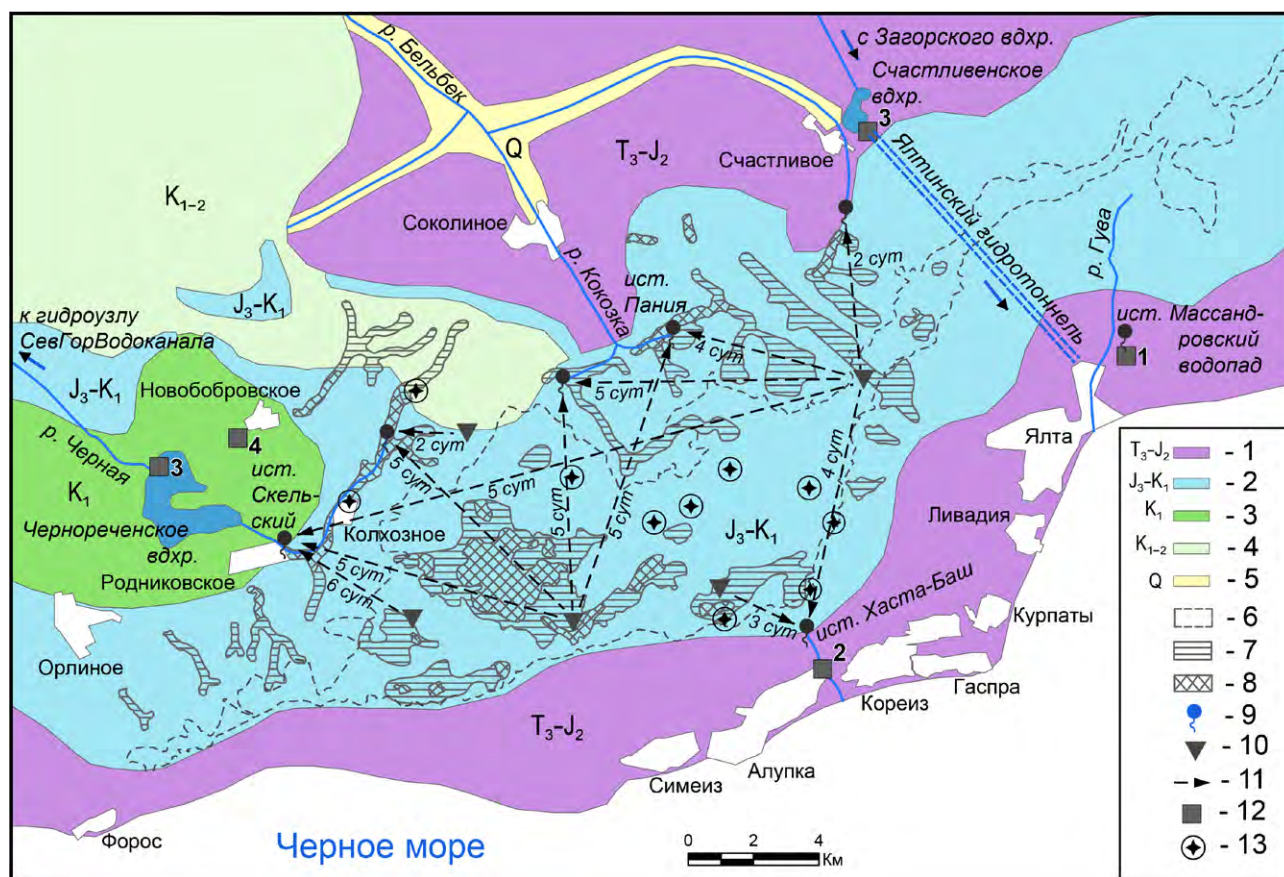


Рис. 6. Схема формирования и движения подземных карстовых вод и основанного на них водоснабжения юго-западной части Горного Крыма. Условные обозначения: 1-5 - залегающие с поверхности горные породы в контексте их водопроницаемости: (1 - слабопроницаемые доверхнеюрские отложения: аргилиты, алевролиты, песчаники; 2 - неравномерно проницаемые закарстованные известняки верхней юры и нижнего мела; 3 - слабопроницаемые глины нижнего мела; 4 - прочие меловые отложения; 5 - четвертичные аллювиальные отложения); 6 - контур бессточного плато массивов; 7-8 - зоны уязвимости подземных вод: 7 - высокой, 8 - очень высокой; 9 - крупные карстовые источники; 10 - точки запуска трассеров; 11 - направление движения подземных вод (условно-обобщенные, в реальности могут иметь более сложную конфигурацию); 12 - водозаборы карстовых вод: 1 - из карстовых источников (источник Массандровский водопад), 2 - из реки, питаемой карстовым источником (Хаста-Баш), 3 - из водохранилищ (Чернореченского, Счастлиенского), питаемых карстовыми источниками (Скельский, Узунджа и др.), 4 - из напорного водоносного комплекса (скважины Байдарской котловины); 13 - объекты высокого риска загрязнения подземных вод.

ПРОБЛЕМА ОХРАНЫ ПОДЗЕМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ЮГО-ЗАПАДНОГО КРЫМА

Условия формирования подземных вод и их использование

Основой водоснабжения юго-западного Крыма являются подземные воды, формирующиеся в верхнеюрских известняках горного массива Ай-Петри. Естественные ресурсы подземных вод оценивались водно-балансовыми методами величиной 110 тыс. м³/сут (Приблуда и др., 1979). По результатам недавней прогнозной оценки методами моделирования, естественные ресурсы подземных вод юго-западной части Горного Крыма составляют 471 тыс. м³/сут. (Шестопалов и др., 2008). Подземные карстовые воды прямо (скважины и источники) или через питаемые ими водохранилища (Счастливенское, Загорское, Чернореченское) используются в водоснабжении Севастополя, Ялты и множества небольших населенных пунктов региона на южном берегу, в Байддарской долине и вдоль северного склона Главной гряды.

Основной областью питания региональной карстовой водоносной системы является вершинная поверхность массива Ай-Петри (рис. 6), характеризующаяся интенсивной, но неравномерно распределенной закарстованностью в виде воронок, котловин, поноров, карровых полей и других форм. В пределах плато задокументировано свыше 1600 воронок, являющихся очагами инфильтрационного питания, минуя эпикарстовую зону. Также минует эпикарстовую зону концентрированное питание через поноры (открытые поглотители). В пределах массива известно свыше 500 пещер, большинство из которых представляют собой вертикальные колодцы и шахты (макс. глубина – 400 м), обеспечивающие быстрый сток через зону аэрации к фреатической зоне. Однако реальное количество высокопроницаемых каналов в зоне аэрации намного большее, что отражается в количестве и распределении всегда связанных с ними воронок.

Значительная часть подземного стока, формирующегося в пределах плато, выводится через каналовые системы в крупные источники на контурах массива, питающие реки и сооруженные на них водохранилища, – главным образом на северных и северо-западных склонах (Пания, Суук-Су, Скульский), но также и на южном склоне (Хаста-Баш, Массандровский; рис. 6). Основной поток подземных вод направлен к северо-западу, к Байддарской котловине, на контуре которой он частично разгружается через источники (с. Родниковское), а частично поступает в напорные водоносные горизонты котловины. Имеются основания предполагать наличие локализованных потоков, пересекающих Байддарскую котловину и разгружающихся в русле р. Черная в Чернореченском каньоне, ниже одноименного водохранилища. Другая часть подземного стока направляется через Байддарскую котловину к очагам субмаринной разгрузки у мыса Айя. О сложной картине распределения подземного стока массива Ай-Петри дают некоторое представление стрелки

на рис. 6, показывающие прямые гидравлические связи по результатам трассерных экспериментов 60-х – 70-х годов. Там же указаны значения времени миграции трассеров по этим направлениям, которые следует расценивать как завышенные в связи с недостаточно высокой дискретностью наблюдений в экспериментах. Реальная картина распределения направлений и скоростей карстовых вод намного более сложная, особенно с учетом изменчивости функционирования каналовых систем в различные режимы обводненности. Для ее выявления необходимо осуществление систематических экспериментов по трассированию в современной постановке.

Наиболее крупные водозаборы показаны на рис. 6. Скважинные водозаборы (на самоизливе) обеспечивают водоснабжение населенных пунктов Байддарской котловины. Ключевую роль в водоснабжении Севастополя играет водозабор в устьевой части р. Черная, питаемый водой, поступающей из Чернореченского водохранилища через одноименный каньон. Само водохранилище питается главным образом из Скульского источника и других источников в долинах Черной и Узунжи. Главным источником водоснабжения Ялты является подаваемая по гидротоннелю вода из Счастливенского водохранилища, в значительной мере питаемого карстовыми водами, а также источник Массандровский. Ряд южнобережных курортов снабжается питьевой водой водозабором на реке Хаста-Баш, питаемой одноименным источником.

Зоны санитарной охраны всех названных водозаборов установлены без учета рассмотренных особенностей карстового питания. Очевидно, что охранные зоны водозаборов, использующих карстовые воды массива Ай-Петри, должны распространяться на основную область питания на его вершинной поверхности.

Оценка уязвимости карстовых подземных вод: Горно-Крымский подход

Для условий карстовой области Горного Крыма был разработан специальный подход (Горно-Крымский) к оценке уязвимости подземных вод. Он основан на концепции Европейского подхода (см. раздел 3) и производных из него методов (СОР, Словенский метод). Все эти методы являются индексно-рейтинговыми системами, где оценка производится на основе набора факторов, имеющих различный присвоенный им «вес» (значимость) и характеризующихся некоторой изменчивостью в пределах территории оценки. Оценка является качественной; её результатом служит разделение оцениваемой территории на участки, характеризующиеся различной степенью уязвимости подземных вод. Количественная оценка на основе параметрических методов и математического моделирования в условиях карста является весьма проблематичной по причинам, описанным в разделе 2, поэтому такие методы, успешно применяемые при оценке уязвимости некарстовых водоносных горизонтов (Шестопалов и др., 2007), в применении к карстовым водоносным системам применения не получили.

При разработке Горно-Крымского подхода были сделаны некоторые методологические коррективы исходных методик и учтена специфика региональных условий карста, что отразилось в наборе и «весе» оцениваемых факторов. Подробное изложение разработанной системы оценки и результаты её опытного применения в условиях Горного Крыма даны в статье (Шестопапов и др., 2009), поэтому ограничимся лишь краткой характеристикой.

Все факторы уязвимости подземных вод разделяются на три группы (рис. 7): группа факторов «О» (от англ. «Overlying layers»), определяющих защищенности подземных вод вышележащими покровами; факторы «С» («Concentration of flow»), определяющие снижение защищенности подземных вод за счет концентрации поверхностного и подземного стока и обхода ими защитных покровов; факторы «Р» («Precipitation regime»), характеризующие количество и режим атмосферных осадков в области питания, которые также могут приводить к снижению защищенности подземных вод.

В качестве защитных покровов, образующих группу факторов «О», рассматриваются почвенный покров, эпикарстовая зона и породы зоны аэрации. Защитная функция почвенного покрова (фактор Os) оценивается по его мощности и механическому составу слагающих его почв. Породы зоны аэрации (фактор Ol) оцениваются по их литологии, мощности и трещиноватости. Защитная функция эпикарстовой зоны (фактор Oe) оценивается по её мощности, определяющей водоудерживающую способность эпикарста.

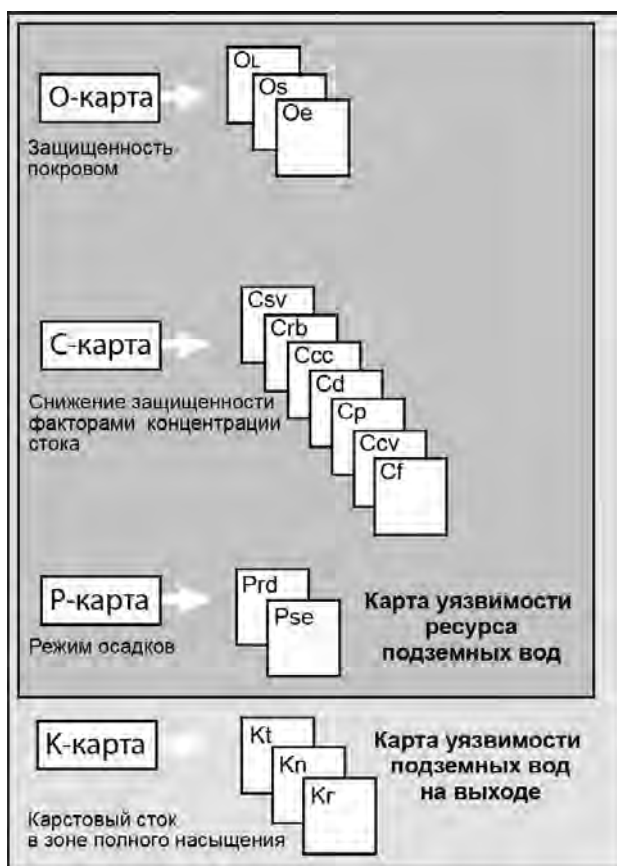


Рис. 7. Пофакторная схема оценки уязвимости карстовых подземных вод по Горно-Крымскому подходу.

При оценке группы факторов «С» учитываются факторы как поверхностного, так и подземного стока. К оцениваемым факторам поверхностного стока отнесены тип водосборов (Ccc), уклоны земной поверхности и характер растительности (Csv), концентрация стока тальвегами и водотоками (Crb), очаговая инфильтрация в воронках (Cd), инфильтрация в поноры (Cp). В качестве оцениваемых факторов подземной концентрации стока рассматривается влияние вертикальных карстовых полостей (Ccv) и зон тектонической трещиноватости (Cf).

Группа факторов «Р» оценивается исходя из среднееголетнего количества дней с высокими (вплоть до экстремальных) количественными значениями выпавших атмосферных осадков. Схема оценки, предложенная в Словенском методе, была оставлена без изменений. Здесь учитываются дни с количеством атмосферных осадков в пределах 20-80 мм/день (Prd) и более 80 мм/день (Pse). При опытной реализации методики оценка этой группы факторов была опущена вследствие недостаточности данных об их изменчивости в пределах оцениваемой территории.

Результатом оценки этих трех групп факторов является карта уязвимости ресурса подземных вод (темно-серый блок на рис. 7), которая различает 5 классов уязвимости: от «очень низкой» до «очень высокой». Оценка уязвимости подземных вод на выходе (светло-серый блок на рис. 7), или уязвимости для конкретного водозабора (источника, скважины или колодца), производится по группе факторов «К», определяющих движение загрязнителя в зоне полного насыщения. Таковыми рассматриваются время прохождения загрязнителя от места сброса к выходу (Kt), развитость карстовой системы (Kn) и вклад отдельных участков водосбора в формирование вод на выходе (Kг). Для оценки этих факторов необходимы данные систематических экспериментов по трассированию подземных вод, проводимых на современном уровне. Результаты предыдущих трассерных экспериментов не отвечают требуемым условиям. По этим причинам достоверная оценка уязвимости для конкретных водозаборов на настоящий момент представляется неосуществимой.

Разработанная методика была апробирована на Ай-Петринском массиве. Площадь оцениваемой территории составила около 320 км². Результаты показывают, что значительная часть области питания региональной карстовой водоносной системы юго-западной части Горного Крыма относится к ареалам высокой и очень высокой уязвимости, распределение которых прогнозируемо имеет дискретный характер (рис. 6).

Следует подчеркнуть, что в пределах этих ареалов в настоящее время осуществляется интенсивное стихийное развитие рекреационной инфраструктуры и 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 безотлагательно корректироваться с учетом результатов проведенного картирования. С учетом высокой концентрации

стока в зоне полного насыщения массива и очень высоких скоростей движения подземных вод можно утверждать, что существующие водозаборы, питаемые этой региональной гидросистемой, находятся в категории высокого риска загрязнения. Очевидно, что их существующие охранные зоны не обеспечивают реальной охраны. Для уточнения конкретных контуров питающих площадей индивидуальных водозаборов, определения динамических параметров карстовых вод в различных режимах обводненности и требуемых режимов охраны необходимы систематические индикаторные исследования по оценке К-показателя.

ВЫВОДЫ

Ресурсы карстовых подземных вод играют важную роль в питьевом водоснабжении ряда регионов Украины, в частности Крыма. Карстовые водообменные системы отличаются от водообменных систем в нерастворимых породах рядом особых свойств, определяющих высокую уязвимость ресурсов подземных вод, их крайне низкую способность к самоочищению и рассеиванию загрязняющих веществ и специфику проблемы охраны источников подземного питьевого водоснабжения в районах экспонированного карста. Существующие нормативные документы по охране подземных вод и водозаборов содержат подходы и критерии, необоснованные и нереалистичные применительно к карстовым водообменным системам.

В организации охраны ресурсов подземных вод и водозаборов в карстовых районах необходимо применение специального подхода, ключевыми особенностями которого являются: 1) выполнение специальной (адаптированной к условиям карста) оценки уязвимости подземных вод к загрязнениям во всей области питания и 2) установление зон охраны водозаборов из подземных и поверхностных источников по принципу не поясной, а дискретной конфигурации, в соответствии с реальным распределением зон высокой уязвимости и распределением направлений и скоростей движения карстовых вод.

Выполненная по специально разработанной методике опытная оценка уязвимости карстовых вод массива Ай-Петри показала, что значительная часть области питания региональной карстовой водоносной системы относится к ареалам высокой и очень высокой уязвимости, распределение которых прогнозируемо имеет дискретный характер. Интенсивное стихийное развитие рекреационной инфраструктуры на массиве Ай-Петри, существующая высокая рекреационная нагрузка и перспективные планы по развитию тут крупномасштабного курорта создает серьезную опасность загрязнения имеющихся водозаборов, прямо или опосредованно питаемых карстовыми водами.

ЛИТЕРАТУРА

Водний кодекс України // Відомості Верховної Ради України (ВВР). – 1995. – № 24. – Ст.189.

Водоснабжение. Наружные сети и сооружения: СНиП 11-31-74 от 29.04.1974 // Государственный комитет Совета

Министров СССР по делам строительства. – М: Стройиздат, 1976. – 146 с.

Глухов И.Г. Гидрогеологические признаки типов карста Горного Крыма // Новости карстоведения и спелеологии, №2. – М., 1961. – 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. – Л: Гидрометеоздат, 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.

Дублянская Г.Н. Дублянский В.Н. Картографирование, районирование и инженерно-геологическая оценка закарстованных территорий. – Новосибирск: СОРАН, 1992. – 144 с.

Климчук А.Б. Основные особенности и проблемы гидрогеологии карста: спелеогенетический подход // Спелеология и карстология. – 2008. – №1. – С. 23-46.

Климчук А.Б. Эпикарст: гидрогеология, морфогенез и эволюция. – Симферополь: Сонат, 2009. – 112 с.

Климчук А.Б. Самоорганизация структуры водообмена как системообразующее свойство карста // Геологический журнал. – 2011. - №1. – С. 85-110.

Положение о порядке проектирования и эксплуатации зон санитарной охраны (ЗСО) источников водоснабжения и водопроводов хозяйственно-питьевого назначения: СанПиН № 2640-82 от 18.12.82 // Главное санитарно-эпидемиологическое управление Министерства охраны здоровья Украины. «Збірник важливих офіційних матеріалів з санітарних протиепідемічних питань». – 1998. – Т. 5. – Часть 2.

Приблуда В.Д., Коджаспиров В.Н., Дублянский В.Н. Баланс подземных вод юго-западной части Горного Крыма // Геологический журнал. – 1979. – №2. – С. 38-46.

Рекомендации по гидрогеологическим расчетам для определения границ зон санитарной охраны подземных источников хозяйственно-питьевого водоснабжения. – М: ВНИИ ВодГео., 1983. – 102 с.

Роговская Н.В. Карта естественной защищенности подземных вод от загрязнения // Природа, 1976. – №3. – С.57-76.

Шестопалов В.М., Богуславский А.С., Бублясь В.Н. Оценка защищенности и уязвимости подземных вод с учетом зон быстрой миграции. – Киев, 2007. – 120 с.

Шестопалов В.М., Богуславский А.С., Климчук А.Б. Моделирование ресурсов подземных вод юго-западной части горного Крыма // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2008. – №4. – С. 5-28.

Шестопалов 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. – 2009. – № 2. – С. 11-29.

Шутов Ю.И. Некоторые данные по гидрогеологии Горного Крыма // Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии Украины. – М.: Недра, 1971. – С. 41-50.

Brenčić M., Prestor G., Kompore B., Matoz H., Kranic S. Integrated approach to delineation of drinking water protection zones // Geologija. – 2009. – № 52 (2). – P. 175-182.

Directive 2000/60/EC establishing a framework for Community action in the field of water policy (<http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/>).

Ford D., Williams D.W. Karst geomorphology and hydrology. – Boston: Unwin Hyman, 1989. – 601 pp.

Margat J. Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine a la pollution. – Orleans: BRGM Publication 68 SGL 198 HYD, 1968. – 123 pp.

Sanz Pérez E. Hidrodinámica de los acuíferos karsticos de las sierras de Urbión y Neila (Burgos) // Estudios Geológicos. – 1996. – Vol. 52, № 5-6. – P. 279-305.

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.

Worthington S., Ford D. Self-organized permeability in carbonate aquifers // Groundwater. – 2009. – v. 47, № 3. – P. 326-336.

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.

Zwahlen F. (Ed.). Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers // Final report COST Action 620, European Commission, Directorate. – Brussel, 2004. – 315 pp.