

Развитие Горно-Крымского подхода к оценке уязвимости подземных вод карстовых районов

НИЦ Украинский Институт спелеологии и карстологии при Таврическом национальном университете им. В.И. Вернадского, г. Симферополь
turnersimf@gmail.com

Аннотация: В статье предлагается подход к оценке уязвимости карстовых подземных вод Горного Крыма, разработанный на базе существующих европейских методик, адаптированный для региональных особенностей карстовых водообменных систем. Результаты оценки и картирования уязвимости подземных вод с использованием данного подхода должны служить основой для эффективной охраны ресурсов и водозаборов карстовых вод Горного Крыма.

Ключевые слова: уязвимость подземных вод, карстовые водообменные системы, Горный Крым, фактор уязвимости, оценка уязвимости

Введение

Концепция уязвимости (защищенности) подземных вод к загрязнению основывается на постулате о том, что физическая среда обеспечивает некоторую природную защищенность подземных вод от антропогенных воздействий, в частности от химических и биологических загрязнений, поступающих в подземную среду. К настоящему времени под уязвимостью подземных вод (УПВ) понимается их чувствительность к загрязнениям, характеризуемая степенью развития комплексной барьерной функции верхней части геологической среды, определяемая развитостью физических и геохимических барьеров [1, 2]. В отечественной гидрогеологической литературе вместо термина УПВ часто используется альтернативный ему термин – защищенность подземных вод, определяемый аналогичным образом.

Оценка и картирование УПВ является эффективным инструментом для осуществления действенной охраны подземных источников питьевого водоснабжения. Результаты такой оценки призваны служить основой для установления границ и режимов зон санитарной охраны водозаборов подземных вод.

Главным критерием оценки УПВ является время достижения загрязнителем поверхности подземных вод или водозабора. В то же время, разработчики методологии данной проблематики [1] подчеркивают, что УПВ является относительным, безразмерным свойством, которое невозможно измерить. Вследствие этого, обычно результаты оценки УПВ – карты УПВ – носят качественный характер. При площадной оценке УПВ производится разделение исследуемой территории (области питания водоносного горизонта) на зоны, характеризующиеся различными геолого-гидрогеологическими и ландшафтно-геохимическими условиями (факторами уязвимости), определяющими различную степень УПВ к загрязнениям.

Концепция УПВ применима ко всем типам водоносных горизонтов – поровым (гранулярным), трещинным и карстовым. Карстовые горизонты характеризуются многоуровневой проницаемостью, уровни которой соответствуют элементарным водовмещающим средам различной природы, структуры и размеров: поровой, трещинной и каналовой. Водообмен в них определяется интегрированными структурами каналовой проницаемости – карстовыми водообменными системами (КВС), в связи с чем карстовые водоносные горизонты отличаются закономерной крайне высокой пространственной неоднородностью, анизотропией емкостных и фильтрационных свойств, высокими скоростями движения подземных вод и общей высокой уязвимостью к загрязнениям [3]. Вследствие этого, в последние десятилетия была осознана необходимость разработки специальных подходов оценки УПВ в условиях карста, учитывающих характер КВС. В результате была разработана общая Европейская методология оценки уязвимости карстовых подземных вод [4]. Важно подчеркнуть, что в условиях карста распределение участков высокой уязвимости дискретно по площади области питания, а их прямая связь с водозаборами может обеспечивать намного более быстрое поступление загрязнителей к водозабору от удаленных участков, чем от участков меньшей уязвимости в ближней к водозабору зоне. Поэтому оценка УПВ является абсолютно необходимой для определения охранных зон водозаборов в таких условиях [5].

Несмотря на формирование общей методологии оценки уязвимости карстовых подземных вод (УКПВ), продолжается тенденция к возникновению модификаций, в которых варьируют состав учитываемых факторов, оценочные критерии и шкалы. Это представляется оправданным трендом, отражающим необходимость учета региональных особенностей развития карста для достижения максимально адекватной оценки уязвимости.

Разработка специального подхода к оценке УКПВ для Горного Крыма, в котором бы учитывались особенности структуры и функционирование региональных КВС, является задачей высокой актуальности в связи с главенствующей ролью карстовых вод в водоснабжении региона.

Методология оценки УПВ в условиях карста

Для оценки УПВ широкое использование получили четыре группы методов: гидрогеологического районирования, математического моделирования, параметрические и индексно-рейтинговые. Первая группа методов, основанная на районировании исследуемой территории по гидрогеологическим условиям, применима для оценки УПВ в мелком масштабе и неприменима для оценки УПВ в пределах отдельного гидрогеологического района (например, карстового массива). Параметрические методы оценки УПВ основаны на допущении об «условно сплошной среде» с однородным распределением фильтрационных свойств, что характерно для водоносных горизонтов порового (гранулярного) или трещинного (с равномерной трещиноватостью) типов. Гидрогеологические особенности карстовых коллекторов (неравномерность и дискретность распределения условий питания по площади, трехуровневая проницаемость с главенствующей ролью в водообмене структур каналовой проницаемости, крайне высокие концентрация и локализация подземного стока, высокие скорости движения подземных вод, превышающие на 3-7 порядков таковые в некарстовых коллекторах) позволяют сделать вывод о неприменимости параметрических методов для оценки их уязвимости. По этой же причине для карстовых условий проблематично применение методов математического моделирования, особенно для площадной оценки, хотя последние показали свою эффективность при оценке уязвимости некарстовых коллекторов, в том числе с учетом зон быстрой вертикальной фильтрации [2].

Практически все существующие методы оценки УКПВ являются индексно-рейтинговыми. Эти методы основываются на простых алгоритмах суммирования или перемножения факторных показателей защитной способности геологической среды и гидрогеологических условий территории. Для каждого из факторов уязвимости присваивается бал (в соответствие с одним из интервалов рейтинговой шкалы данной характеристики) и весовой коэффициент (соответствующий значимости данного фактора для УПВ). Итоговая сумма/произведение взвешенных значений факторов ранжируется по градациям уязвимости (например, от низкой до высокой).

Итоговый отчет по Программе COST Action 620 [4], в ходе которой была разработана Европейская методология оценки УКПВ, указывает на то, что концепция оценки уязвимости должна основываться на модели «происхождение-путь-цель» (рис. 1). Оценку УПВ, в зависимости от целевого объекта, можно производить двумя способами. 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. 1 – *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. 1 – *уязвимость на выходе*).

Все факторы уязвимости подземных вод разделяются на три группы (рис. 1): 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. Результатом оценки этих трех групп факторов является карта уязвимости ресурса подземных вод. Оценка уязвимости подземных вод на выходе (или уязвимости для конкретного водозабора: источника, скважины или колодца), производится по группе факторов “К”, определяющих движение загрязнителя в зоне полного насыщения.

На базе Европейской методологии были разработаны частные подходы оценки УПВ, самые известные из которых метод COP [7] и Словенский подход [8].

Основой для выбора и развития методики региональной оценки УКПВ должно служить специальное районирование по условиям развития карста. Основными особенностями условий карста Горного Крыма (следовательно, и факторов УКПВ), имеющими высокую значимость для выбора и адаптации методики оценки уязвимости, являются:

- цокольное строение основных карстовых массивов ГК с наличием межгорных прогибов (безнапорные и напорные условия КПВ);
- высокая интенсивность и, в то же время, неравномерность развития карста в связи с литологической изменчивостью карстующихся известняков (содержание нерастворимого остатка) и большими тектоническим контролем карстогенеза;
- геоморфологическая выраженность платообразных поверхностей массивов с замкнутыми водосборами (внутренний дренаж), играющих роль основной области питания подземных КВС;

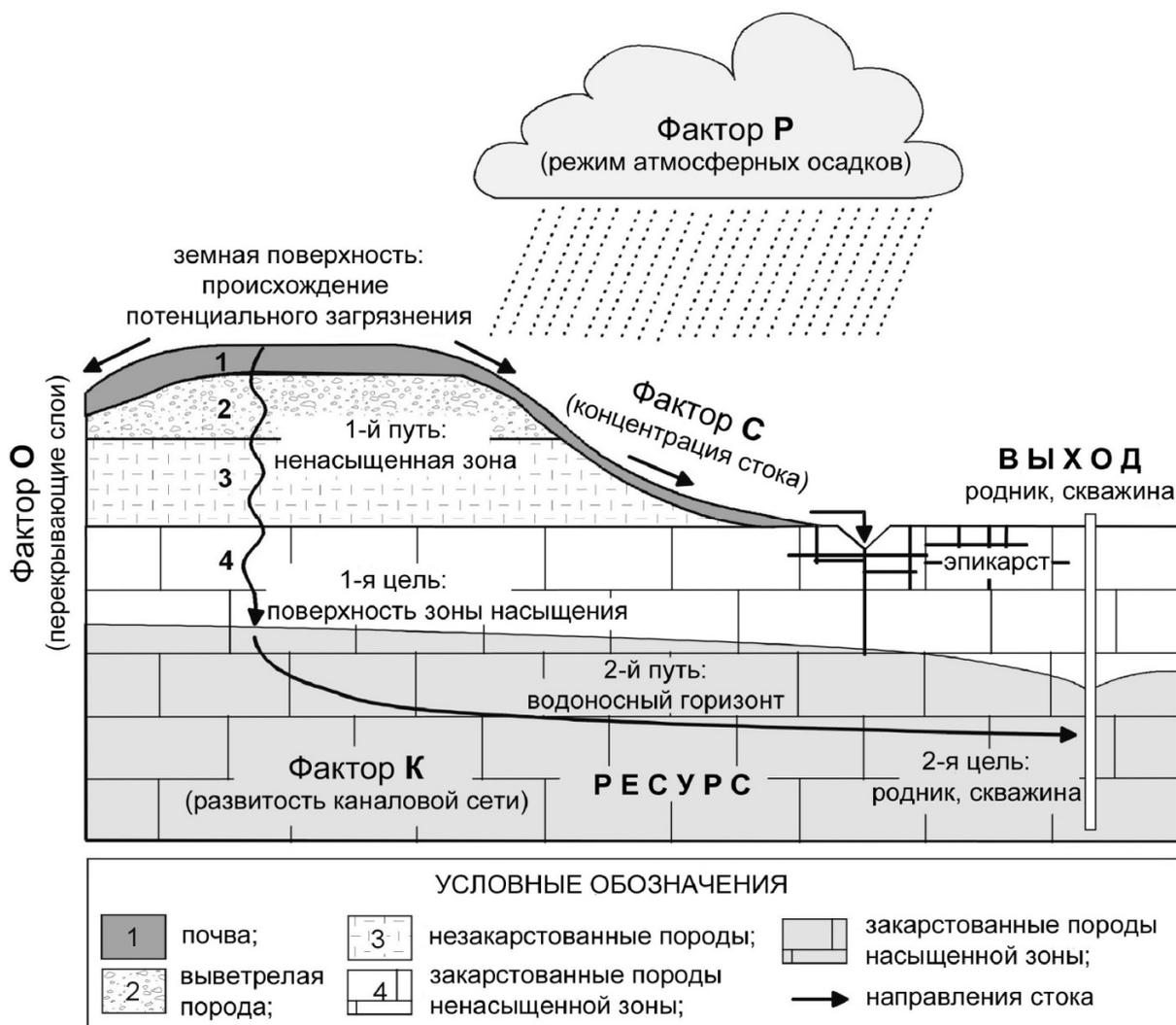


Рис. 1. Концептуальная модель распространения загрязнений в системе «происхождение – путь – цель» и факторов уязвимости ресурса и выхода согласно Европейскому подходу [6].

- согласно эволюционной типологии карста [9] для вершинных (плато) и склоновых частей массивов характерен раскрытый (экспонированный) карст, на отдельных участках – покрытый, для межгорных котловин – закрытый (артезианские условия);

- практически полное отсутствие на плато массивов покровных слабопроницаемых отложений и, как следствие, преобладание автогенного питания и, как следствие, низкая роль аллогенного питания;

- мозаичность почвенного покрова, характеризующегося в основном малыми мощностями (до 1 м).

- интенсивное развитие эпикарстовой зоны, выраженной геоморфологически и функционально, и выполняющей по отношению к водам насыщенной зоны существенную буферную функцию;

- высокая доля в питании подземных вод снежных осадков зимнего периода, при второстепенной роли дождевых осадков теплого периода;

- отсутствие (за единичными исключениями) точечной инфлюации (активных поглотителей) при наличии линейной инфлюации (в местах пересечения русел рек и зон тектонической трещиноватости);

- широкое распространение очаговой инфильтрации (например, в днищах карстовых воронок).

Существующие методики оценки УКПВ были проанализированы на предмет концептуальной 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. Сравнительный анализ показал, что ни одна из предложенных методик не подходит условиям Горного Крыма в полной мере, ввиду недостаточного учета ими особенностей условий формирования подземных вод данного региона. Кроме того, большинство методик, на наш взгляд, содержат некоторые методологические упущения. Решение этой проблемы видится в: 1) выборе наиболее развитых и адекватных данным условиям методик, 2) их модификации в части отдельных концептуальных упущений, 3) дополнительной адаптации к региональным условиям оцениваемой территории (Горного Крыма). Кроме того, важно установить масштаб оценки и

картирования, что определит детальность требуемых исходных данных, дробность шкал значений оцениваемых факторов и, как следствие, размерность выделяемых площадей

Горно-крымский подход оценки уязвимости подземных вод

В качестве методической основы для разработки метода оценки УКПВ Горного Крыма был избран Словенский подход [8], который, в свою очередь, является модификацией метода COP [7]. Анализ этих методов показал довольно высокую степень их методологической развитости и верифицируемости, а также гибкость и простоту в применении. Тем не менее, необходимы существенные изменения в части состава и группировки факторов, учитываемых избранной методикой, с целью её адаптации к условиям Горного Крыма. Поэтому, можно говорить о развитии собственного регионального подхода к оценке УПВ в условиях карста, получившего название «Горно-Крымский подход».

Основная адаптация базовой методики заключалась в следующем:

- в группу факторов “О” введена оценка защитной функции эпикарста [10];
- в факторах концентрации стока (“С”) опущена оценка аллогенного питания и влияния крупных активных поглотителей (точечная инфлюация) в связи с их неразвитостью в данном регионе; в то же время, введена оценка факторов подземной концентрации стока в вадозной зоне (зон быстрой фильтрации) вдоль разломных зон и через глубокие карстовые полости; добавлена оценка руслового стока с учетом линейной инфлюации в местах пересечений водотоков зонами высокой трещиноватости (разломами); увеличен вес влияния карстовых воронок, в которых происходит очаговая инфильтрация (зоны быстрой вертикальной фильтрации и миграции).
- в оценке показателя режима атмосферных осадков кроме интенсивности жидких осадков (в теплый период) также учитывается питание за счет твердых осадков зимнего периода (по количеству интенсивных снеготаяний в течение холодного периода).

Вместе с тем была максимально сохранена общая методология и шкалы оценочных значений, принятых в Словенском подходе и его предшественниках.

Тестовая версия Горно-Крымского подхода оценки УКПВ была разработана и апробирована ранее на примере Ай-Петринского карстового района [11]. Полученные результаты показали довольно высокую мозаичность и неравномерность распределения площадей с различной уязвимостью. Это было связано с излишне высокой, как для среднемасштабного картирования (1:100 000), детальностью некоторых исходных данных (в частности, топографии, масштаб которой был 1:25 000). Такая детальная рельефная основа позволяет выделять довольно мелкие орографические элементы (с размерами по короткой оси до 50 м), чем и воспользовались авторы при составлении схемы оценки факторов концентрации стока (карта “С”). В то же время, масштаб других исходных данных (в частности, касающихся геологических и гидрогеологических условий) был гораздо мельче масштаба топоосновы (1:50 000 – 1:200 000), а точность их привязки к местности – низкой. Таким образом, противоречивость масштаба исходных данных не позволила получить адекватную карту УПВ оцениваемого района. Для стандартов среднемасштабных карт она оказалась излишне подробной (особенно, в отношении орографической сети и карстовых поверхностных форм), а для крупномасштабного картирования (1:25 000 – 1:50 000) не была обеспечена полным набором исходных данных соответствующего масштаба. Очевидно, что методические схемы оценки факторов УПВ (особенно, факторов “С”) для различных масштабов картирования должны быть различными (табл. 1). Кроме детальности и размеров выделяемых площадей это касается дробности деления шкал оцениваемых параметров: чем мельче масштаб, тем шире диапазон проявления фактора и тем шире интервал его деления, и наоборот. Так, например, оценка фактора режима атмосферных осадков, по большому счету, имеет смысл только в региональном масштабе (например, для Юго-Западной части Горного Крыма), поскольку в локальном масштабе (например, для Западно-Айпетринского карстового подрайона) данный фактор либо вообще не будет иметь сколь-нибудь значимой вариабельности, либо картируемость последней будет слишком сложной задачей (что вряд ли будет оправдано целью оценки). Интересно, что при укрупнении масштаба оценки происходит смещение значимости оцениваемых факторов от геологических и гидрогеологических (при региональном масштабе) к ландшафтно-топографическим (при локальном и местном масштабах). Это объясняется тем, что картирование геологических элементов часто доступно лишь в мелком масштабе, в то время как ландшафтно-топографические условия обладают более высокой внешней изменчивостью и, поэтому, легко картируются в крупном масштабе с высокой детальностью.

Первостепенной задачей данной работы поставлена разработка оптимального подхода для оценки и картирования УКПВ в масштабе 1:50 000 – 1:100 000, под который и была адаптирована оценочная схема и подобран исходные данные соответствующего масштаба. Оценочная схема факторов уязвимости, по сравнению с первоначальной версией методики, была значительно упрощена (главным образом, это касается факторов “С”). Оценка некоторых факторов, которые практически не отражаемы в региональном масштабе, была элиминирована. Также были оптимизированы присваиваемые рейтинговые значения для отдельных факторов.

Таблица 1.

Выбор метода и набора исходных данных и картируемых факторов для оценки УКПВ в зависимости от масштаба картирования

Масштаб (пример)	Региональный 1:200 000 и мельче (Горный Крым)	Локальный 1:100 000 - 1:50 000 (Ай-Петринский массив)	Местный 1:25 000 и крупнее (Центральная Ай-Петринская котловина)
Методы	Гидрогеологическое районирование	Индексно-рейтинговые	Индексно-рейтинговые, математическое и статистическое моделирование
Исходные данные	Геологические и гидрогеологические карты соответствующих масштабов и крупнее	Топографические карты и космоснимки масштаба 1:50 000 и крупнее; ЦМР, геологические и почвенные карты соответствующих масштабов; кадастровые данные карстовых полостей, данные метеостанций	Топографические карты и космоснимки соответствующего масштаба и крупнее; геологические и почвенные карты максимально крупного масштаба; полевые наблюдения и картирование; топографические съемки карстовых полостей, результаты георадарной (электрофизической) съемки с интерпретацией
Картируемые факторы	Распространение водоносных горизонтов различного типа; условия напора, перекрытость слабопроницаемыми отложениями	Почвенный и растительный покров, литология пород, наличие слабопроницаемых покровов, эпикарст, гидрографическая сеть, уклоны поверхности, зоны инфлюации поверхностного стока, зоны тектонической трещиноватости, распределение (плотность) поверхностных и подземных карстовых форм рельефа	Почвенный и растительный покров, наличие слабопроницаемых покровов, отдельные элементы гидрографической сети, уклоны поверхности, точки инфлюации поверхностного стока, зоны повышенной трещиноватости пород, отдельные поверхностные и подземные карстовые формы рельефа

О-индекс (защищенность покровами)

Комплексный показатель "О" (рис. 2.) включает оценку факторов защищенности подземных вод, обуславливающих задержку потенциальных загрязнителей и снижение возможности загрязнения основного тела подземных вод. К защитным покровам относятся все толщи выше зоны полного насыщения, включая вмещающие карстующиеся породы вадозной зоны, покровные отложения, почвенный покров. В связи с особой гидрогеологической и морфогенетической ролью эпикарстовой зоны в верхней части экспонированной карстующейся толщи [10], мы вводим в оценку показателя "О" фактор эпикарста и подпочвенного слоя (Ое). Выделяемые категории и присваиваемые им значения в оценке почвенного покрова (Os) и литологии (OL), а также результирующие рейтинговые категории показателя "О" в целом приняты из предшествующих методов (СОР, Словенский подход).

Почвенный покров (Os). Оценка фактора осуществляется с учетом мощности и гранулометрического состава почвенного покрова. Схема оценки практически идентична предложенной в Словенском методе. Однако, в условиях крымского горного карста мощность почв, преимущественно глинистого и суглинистого механического состава, крайне редко превышает 1 м, в отличие от словенских условий. В то же время, как показывают проведенные исследования водно-физических свойств почв карстовых плато в Крыму [12], полуметровая толща почвы обладает весьма высокой водоудерживающей способностью (полевая влагемкость до 300 мм), тем самым обеспечивая значительную защитную функцию по отношению к подземным водам. Таким образом, по сравнению со Словенским методом, оценочная шкала по данному фактору была несколько сдвинута в сторону больших значений присваиваемых баллов. Принятые граничные значения мощностей почв между различными классами защищенности соответствуют ранжированию, предложенному при расчете водного баланса для карстовых массивов Горного Крыма [13].

Эпикарст и подпочвенный слой (Ое). 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 карстовых массивов Горного Крыма, 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.



Рис. 2. Схема оценки факторов защищенности покровами (О-индекс).

Площадная изменчивость последнего свойства может быть выявлена лишь детальными геофизическими (георадарные методы) исследованиями, которые на в Горном Крыму производились лишь фрагментарно [14]. Поэтому, оценка эпикарста осуществляется прежде всего на основе его мощности. Важнейшей особенностью распределения эпикарста является наличие в нем "дыр" (в фильтрационном смысле) – днищ карстовых воронок и входов вертикальных полостей, которые характеризуются нулевой защитной способностью эпикарста. В местах, где на поверхность выходят некарстовые породы (глины, песчаники, конгломераты и др.), значение Oe присваивается в зависимости от литологии подпочвенного горизонта, которая обуславливает выполняющую последним защитную функцию.

Результаты оценки показателя "О" выражаются в О-карте, получаемой путем сложения факторов Os, OL и Oe и рейтингового ранжирования площадей. Эта карта отражает степень защищенности подземных вод.

С-индекс (снижение защищенности за счет поверхностной и подземной концентрации стока)

Показатель "С" отражает факторы концентрации поверхностного и подземного стока. В базовых методиках (СОР и Словенский подход) 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 крупными понорами стока, сформированного на смежных некарстовых площадях, что имеет огромное значение в словенском карсте в связи с широким развитием контактных условий (переходом руслового стока с некарстовых площадей на карст) и крупных польев и озер. В пределы карстовых 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 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 невозможно, 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.

Схема оценки группы факторов "С" представлена на рисунке 3.

В разработанной и реализованной модификации метода учитываются следующие факторы концентрации поверхностного стока:

- *C_{rb}* – *русловый сток и инфлюации*. Предложено выделять два пояса буферных зон вокруг русел водотоков (действующих большую часть года), а также учитывать близость к зонам линейной инфлюации в местах пересечения руслами закарстованных участков с повышенной трещиноватостью пород, связанных с разломами. Аналогично оцениваются тальвеги балок, замыкающиеся на активные поглощители. Остальная площадь оценивается по плотности овражно-балочной сети, поскольку в тальвегах балок также происходит (хоть и временно) концентрация поверхностного стока и быстрый его перевод в подземных сток, что снижает защищенность подземных вод.

- *C_{sv}* – *уклоны поверхности и растительность*. Здесь приняты оценочные критерии и шкалы словенской схемы. В отличие от базовых методик, при оценке данного фактора, мы не разделяем оцениваемую территорию на основании водопроницаемости выходящих на поверхность пород. Это мотивируется тем, что карстовые массивы Горного Крыма, как было сказано выше, не имеют слабопроницаемых покровов. В то же время, мы разделяем территорию оценки на основании открытости/закрытости водосборов. В условиях замкнутых водосборов (плато карстовых массивов) концентрация стока в связи с уклоном и растительностью более критична для УПВ, чем в открытых водосборах. При оценке это выражается в присвоении участкам замкнутых водосборов более низких баллов, что соответствует более высокой уязвимости.

- *C_d* – *карстовые воронки*, выступающие очагами инфильтрации. Оценка производится на основании карты плотностей воронок, поскольку выделение буферных зон для каждой воронки в избранном масштабе картирования представляется нецелесообразным.

- *C_f* – *крупные тектонические нарушения (разрывы)*. Разрывы и приразрывные зоны представляют собой зоны концентрированной быстрой фильтрации в трехмерном объеме зоны аэрации, обеспечивающие быстрый перевод стока и потенциальных загрязнителей к фреатической зоне. Следовательно, они являются зонами высокой уязвимости. Различные значения и размеры зон придаются разрывам различного порядка.

- *C_{cv}* – *карстовые полости*. Вертикальные пещеры (шахты) выступают в качестве активных проводников стока из эпикарстовой зоны во фреатическую зону. Оценка фактора производится подразделением пещер на несколько категорий по глубине, в зависимости от чего каждой пещере присваивается весовой коэффициент. Учитываются только гидрологически активные полости. Далее строится карта площадной концентрации пещер с учетом весовых коэффициентов, разбивка полученного распределения на категории с присвоением им соответствующих баллов.

Результаты оценки показателя "С" выражаются в С-карте, получаемой путем умножения факторных значений *C_{rb}*, *C_{sv}*, *C_d*, *C_f* и *C_{cv}* и рейтингового ранжирования площадей. Чем ниже значение каждого из факторов и, соответственно, их произведения, тем выше снижение защищенности и, следовательно, выше уязвимость по данному фактору и их комплексу.



Рис. 3. Схема оценки факторов концентрации поверхностного и подземного стока (С-индекс).

Р-индекс (режим атмосферных осадков)

Режим осадков влияет на скорость инфильтрации и движения подземных вод и, следовательно, на транспорт загрязнителей к водоносному горизонту. В базовых методиках Р-показатель отражает количество и интенсивность осадков, что оценивается на основе дневных сумм 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, т.е. увеличивает уязвимость подземных вод.

В базовой словенской 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.). Нами в оценку режима осадков, наряду с оценкой интенсивности жидких осадков, был добавлен учет интенсивности стаивания снега (рис 4).

Следует отметить, что учет факторов "Р" имеет смысл лишь в случае значительных различий режима атмосферных осадков в пределах района оценки УГВ. В случае единого режима атмосферных осадков по всей площади оцениваемого района оценку факторов "Р" можно опустить.



Рис. 4. Схема оценки факторов режима атмосферных осадков (Р-индекс).

Результирующая карта уязвимости ресурса подземных вод складывается путем умножения показателей "О", "С" и "Р" и ранжирования итоговых значений, с выделением следующих классов (зон) уязвимости (рис. 5): 1) Очень высокой; 2) Высокой; 3) Средней; 4) Низкой; 5) Очень низкой.

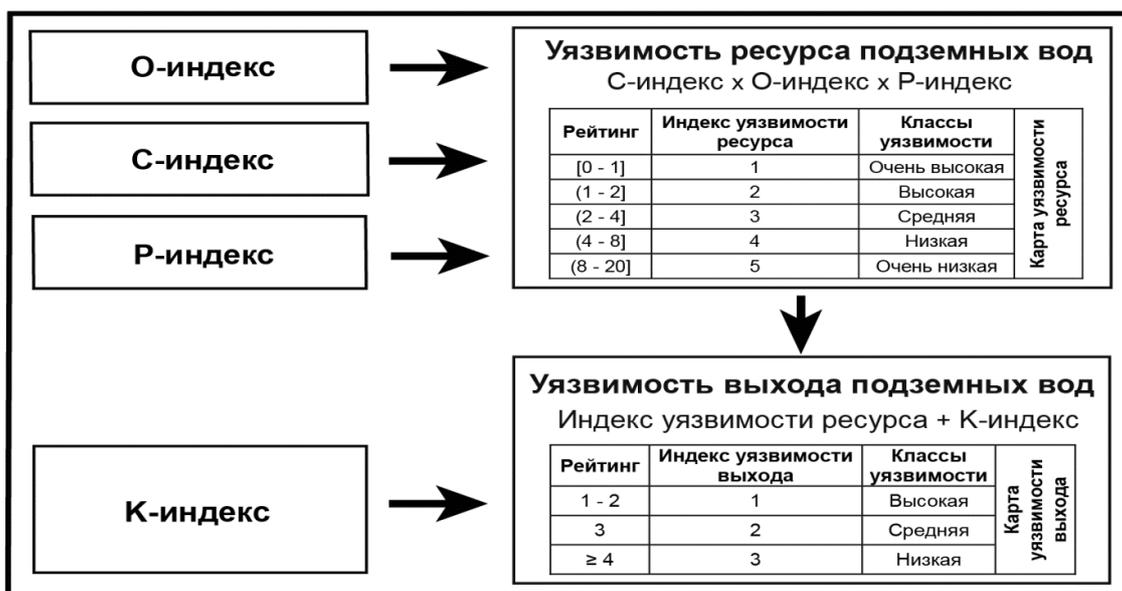


Рис. 5. Схема оценки уязвимости ресурса и уязвимости выхода подземных вод.

К-индекс (карстовый сток в зоне полного насыщения)

К-показатель отражает преимущественно латеральное движение подземных вод в насыщенной зоне к источникам или скважинам (сегмент 2 на рис. 1). Этот показатель включается в оценку и картирование уязвимости выходов подземных вод (полной уязвимости) (рис. 5). Принятая схема оценки идентична предложенной в Словенском подходе (рис. 6). К оцениваемым факторам относятся время прохождения загрязнителя от места сброса к выходу (K_t), развитость карстовой системы (K_n) и вклад отдельных участков водосбора в формирование вод на выходе (K_f). Для оценки этих факторов необходимы дополнительные исследования по выявлению структуры и характеристик карстовых систем в нижних гидродинамических зонах, в частности – систематические индикаторные исследования по определению связей выделенных зон высокой уязвимости по условиям питания с основными пунктами разгрузки и водопотребления, а также определению гидродинамических свойств водопродящих каналов (зон).

К-индекс (развитость канальной сети) $K_t + K_n + K_r$	К-рейтинг	К-индекс	Класс уязвимости	К-КАРТА
	[0 - 1]	0	Высокий	
	(1 - 30]	1	Средний	
	(30 - 125]	2	Низкий	

(Kt) Время достижения выхода (сут)		(Kn) Преобладающая проницаемость		(Kr) Вклад и связь	
≤ 1	1	Каналовая	1	≤ 1%, временная, удаленная	1
(1 - 10]	3	Переходная	3	(1 - 10%], переменная	3
> 10	5	Трещинная	5	> 10%, всегда прямая	5

Рис. 6. Схема оценки факторов карстового стока в зоне полного насыщения (К-индекс).

Как и для всех индексно-рейтинговых методов, для Горно-Крымского подхода самым критическим вопросом является проблема определения «весов» оцениваемых факторов, то есть их значимости в формировании итогового результата оценки. Чувствительность результатов оценки к каждому из учитываемых факторов определяются их весовыми значениями. На рисунке 7 наглядно проиллюстрирована значимость отдельных оцениваемых факторов в получении итогового значения уязвимости. Полученное соотношение на наш взгляд хорошо согласуется с существующими представлениями о вкладе каждого из факторов в формирование уязвимости подземных вод оцениваемой территории.

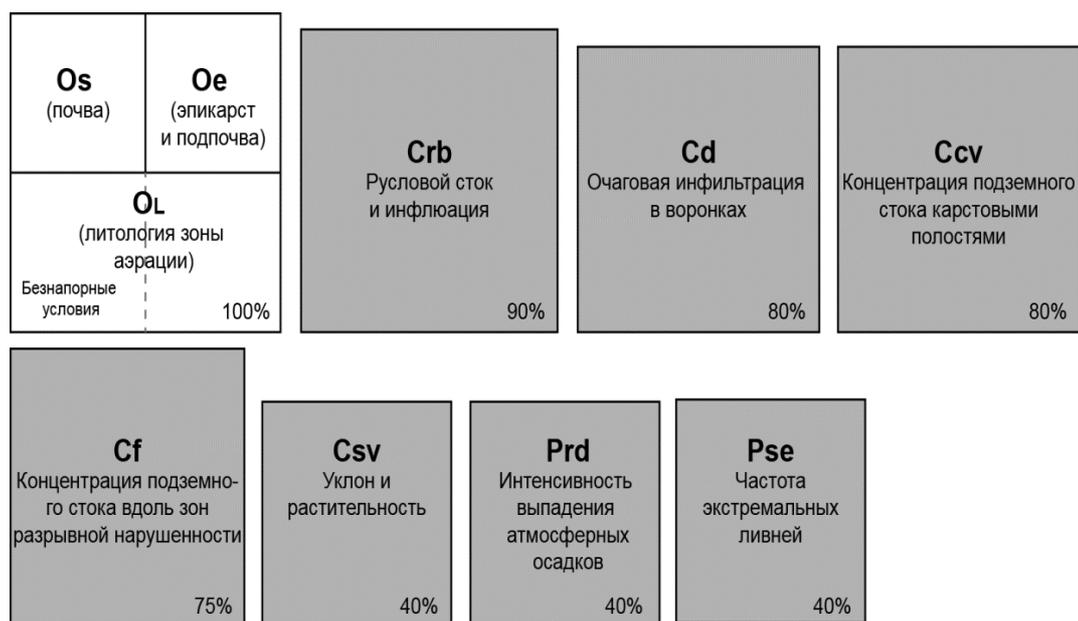


Рис. 7. Соотношение «весов» оцениваемых факторов согласно схеме Горно-Крымского подхода оценки УКПВ. Белым квадратом обозначена группа факторов защищенности (площадь квадрата пропорциональна максимальному значению защищенности), серыми квадратами – факторы снижения защищенности (площади квадратов пропорциональны максимальному значению снижения защищенности).

Литература

1. Vrba J. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability / J. Vrba, A. Zaporozec // International Contributions to Hydrogeology, International Association of Hydrogeology, Heise, Hanover, 1994. – V. 16.– 131 pp.
2. Шестопалов В. М. Оценка защищенности и уязвимости подземных вод с учетом зон быстрой миграции / В. М Шестопалов, А. С. Богуславский, В.Н. Бублясь. – Киев, 2007. – 120 с.
3. Климчук А. Б. Основные особенности и проблемы гидрогеологии карста: спелеогенетический подход / А. Б. Климчук // Спелеология и карстология. – 2008. – №1. – С. 23-46.
4. Zwahlen F. (Ed.). COST Action 620. Vulnerability and risk mapping for the protection of car-bonate (karst) aquifers / F. Zwahlen // Final report COST Action 620, European Commission, Directorate. – Brussels, 2004. – 315 pp.

5. Климчук А. Б. Рекомендации по охране подземных источников питьевого водоснабжения в карстовых регионах / А. Б. Климчук, С.В. Токарев // Спелеология и карстология. – 2014. – №12 (в печати).
6. Goldscheider N. The European Approach. In: COST Action 620. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers / N. Goldscheider, I.C. Popescu // Final report COST Action 620, European Commission, Directorate, Brussels. –2004. – P. 17-22.
7. Vias J. M. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method / J. M. Vias, B. Andreo, M. J. Perles, F. Carrasco, I. Vadiillo, P. Jimenez // Hydrogeology Journal. – 2006. – № 14. – P. 912-925.
8. Ravbar N. Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia / N. Ravbar, N. Goldscheider // Acta carsologica 36/3. - 2007. – P. 397-411.
9. Климчук А. Б. Эволюционная типология карста / А. Б. Климчук // Спелеология и карстология. – 2010. – №4. – С. 23-32.
10. Климчук А. Б. Эпикарст: гидрогеология, морфогенез и эволюция / А. Б. Климчук. – Симферополь: Сонат, 2009. – 112 с.

Анотація. С. В.Токарев, О. Б. Климчук **Розвинення Гірсько-Кримського підходу до оцінки вразливості підземних вод карстових регіонів.** У статті пропонується підхід до оцінки уразливості карстових підземних вод Гірського Криму, розроблений на базі існуючих європейських методик, адаптований до регіональних особливостей карстових водообмінних систем. Результати оцінки на картування вразливості підземних вод з застосуванням даного підходу мають служити основою для ефективної охорони ресурсів карстових вод Гірського Криму та їх водозаборів.

Ключові слова: вразливість підземних вод, карстові водообмінні системи, Гірський Крим, фактор вразливості, оцінка вразливості.

Abstract. S. V. Tokarev, A. B. Klimchouk **Developing of the Crimean-Mountain approach for groundwater vulnerability assessment in karst regions.** The approach for vulnerability assessment of karst groundwater in the Mountainous Crimea developed on the base of European methods and adapted to regional karst aquifers features is proposed in the article. The results of groundwater vulnerability assessment and mapping via use of this approach should act as a ground for effective protection of karst groundwater resources and its intakes in the Mountainous Crimea.

Keywords: groundwater vulnerability, karst aquifers, Mountainous Crimea, vulnerability factor, vulnerability assessment.

Поступила в редакцію 12.02.2014 г.