

11. Парубець О.В. Изменения и колебания климата // Трансформация ландшафтно-экологических процессов в Крыму в XX веке-начале XXI века / под ред. В.А. Бокова. – Симферополь: ДОЛЯ, 2010. – С. 88-99.
12. Пенюгалов А.В. Климат Крыма: Опыт климатического районирования. – Симферополь: Крымгосиздат, 1930. – 178 с.
13. Ретеюм А.Ю. Климат Крыма в прошлом, настоящем и будущем // Трансформация ландшафтно-экологических процессов в Крыму в XX веке-начале XXI века / под ред. В.А. Бокова. – Симферополь: ДОЛЯ, 2010. – С. 67-87.
14. Didukh, Ya.P. The ecological scales for the species of Ukrainian flora and their use in synphytoindication. – Kyiv: Phytosociocentre, 2011. – 176 p.
15. StatSoft, Inc. (2005): STATISTICA for Windows. Version 7.0. – URL: <http://www.statsoft.com>.
16. Tichy L. JUICE, software for vegetation classification // J. Veg. Sci. – 2002. – 13. – P. 451-453.

#### Транслітерована література

1. Vahrushev B. A. Morfologicheskij analiz poverhnostnogo karsta Krymskih gor // Kul'tura narodov Prichernomor'ya. - 2002. - № 35. - S. 15-20.
2. Vahrushev B.A. Rol' gidrohimicheskikh prevraschenij v karstovom geomorfogeneze // Speleologiya i karst. -2010. - №4. - S. 33-43.
3. Ved' I. P. Klimaticheskij atlas Kryma. - Simferopol': Tavriya-Plyus, 2000. - 120 s.
4. Ved' I. P. Klimat i oblesenie krymskih nagorij / red. A.N. Oliferov.- Simferopol': TNU, 2007. - 133 s.
5. Didukh Ya.P. Ekolozhno-energetychni aspekty u spivvidnoshenni lisovykh i stepovykh ekosystem // Ukr. botan. zhurn. – 2005. – 62, #4. – S. 455-467.
6. Didukh Ya.P. Osnovy bioindykatsiyi. – K.: Nauk. dumka, 2012. – 342 s.
7. Didukh Ya.P., Pavlyuk V.S. Landshaftno-ekolozhichni osoblyvosti rozpodilu roslynnykh uhrupovan' u karstovykh liykakh Prut-s'ko-Dnistrovs'koho Lisostepu // Ukr. botan. zhurn. – 2008. – 65, #4. – S. 495-503.
8. Dragan N.A. Pochvennye resursy Kryma i ih racional'noe ispol'zovanie. - Simferopol': DOLYa, 2004. - 208 s.
9. Ena V.G., Ena Al. V., Ena An. V. Zapovednye landshafty Tavriidy. - Simferopol': Biznes-Inform, 2004. - 424 s.
10. Oliferov A.N. Yajla: geografiya, les, voda. - Simferopol': Biznes-Inform, 2011. - 192 s.
11. Parubec O.V. Izmeneniya i kolebaniya klimata // Transformaciya landshaftno-ekologicheskikh processov v Krymu v HH veke-nachale HH veka / pod red. V.A. Bokova. - Simferopol': DOLYa, 2010. - S. 88-99.
12. Penyugalov A.V. Klimat Kryma: Opyt klimaticheskogo rajonirovaniya. - Simferopol': Krymgosizdat, 1930. - 178 s.
13. Retejum A.Yu. Klimat Kryma v proshlom, nastoyaschem i buduschem // Transformaciya landshaftno-ekologicheskikh processov v Krymu v HH veke-nachale HH veka / pod red. V.A. Bokova. - Simferopol': DOLYa, 2010. - S. 67-87.
14. Didukh, Ya.P. The ecological scales for the species of Ukrainian flora and their use in synphytoindication. - Kyiv: Phytosociocentre, 2011. - 176 p.
15. StatSoft, Inc. (2005): STATISTICA for Windows. Version 7.0. - URL: <http://www.statsoft.com>.
16. Tichy L. JUICE, software for vegetation classification // J. Veg. Sci. - 2002. - 13. - R. 451-453.

Інститут ботаніки Національної академії наук України, Київ

Стаття надійшла до редакції 28.10.2013

УДК 551.444:504.43

**А.Б. Климчук, С.В. Токарев**

### **ПРОБЛЕМЫ ОХРАНЫ ИСТОЧНИКОВ ПИТЬЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЭКСПОНИРОВАННОГО КАРСТА**

**А.Б. Климчук, С.В. Токарев**

**ПРОБЛЕМЫ ОХРАНЫ ИСТОЧНИКОВ ПИТЬЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЭКСПОНИРОВАННОГО КАРСТА**

Украинский Институт спелеологии и карстологии при Таврическом национальном университете имени В.И. Вернадского, Симферополь

Карстовые водообменные системы характеризуются рядом специфических особенностей, обуславливающих их высокую чувствительность к загрязнениям. 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; 2) установление зон охраны водозаборов из подземных источников по принципу не поясной, а дискретной конфигурации, в соответствии с реальным распределением зон высокой уязвимости, направлений и скоростей движения карстовых вод.

**Ключевые слова:** карстовая водообменная система; уязвимость подземных вод; зона санитарной охраны; водозабор.

© А.Б. Климчук, С.В. Токарев, 2014

**A. Klimchouk, S. Tokarev**

**THE PROBLEMS OF GROUNDWATER SOURCE PROTECTION FOR DRINKING WATER SUPPLY UNDER CONDITIONS OF EXPOSED KARST**

*Ukrainian Institute of speleology and karstology, V.I. Vernadsky Tavria National University, Symferopol*

*Karst water exchange systems are characterized by a number of specific features, resulting in their high sensitivity to contamination. Although a significant portion of karst groundwater in the structure of water supply in certain regions of Ukraine, the existing regulations on the protection of groundwater do not address specific karst water-exchange systems. The article explains the need for a special approach to the organization of groundwater resources protection in karst areas. Its key features are: 1) to perform special (adapted to the conditions of karst) groundwater vulnerability assessment to contamination throughout the food area, and 2) establishment of underground water sources protection zones based not on the principle of belt but discrete configuration, in accordance with the actual high vulnerability distribution areas, direction and speed of karst water. Article is illustrated with examples of problematic situations and recommendations how to resolve them in the conditions exposed Crimea Mountains Karst, in particular - Ai-Petri range in its southwestern part.*

**Keywords:** *karst water exchange system; groundwater vulnerability; sanitary protection zone; water reservoirs; 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.

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, около 67 % территории страны подстилаются растворимыми породами [8]. 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.

Применительно к подземным источникам водоснабжения - водозаборами 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 [12], 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.

Цель данной работы – анализ проблемы охраны ресурсов подземных вод и источников водоснабжения в районах развития экспонированного карста и определение путей её решения.

### **Особенности гидрогеологии районов экспонированного карста**

Решения большинства миграционных задач гидрогеологии основаны на концепции условно-сплошной среды с непрерывными свойствами, в которой распределение пустотности принимается беспорядочным, а параметры пустотности и проницаемости усредняются в пределах некоего представительного объема пласта на основе экспериментальных данных (скважинных, геофизических и лабораторных) и расчетов.

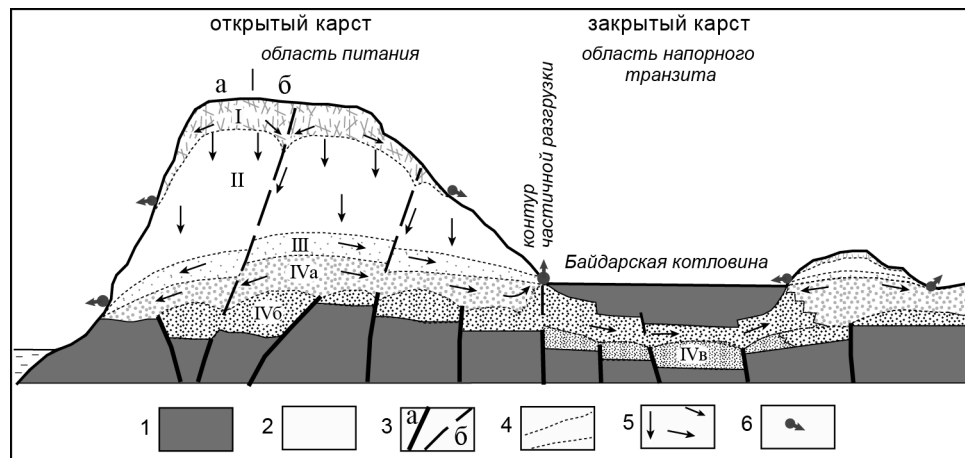


Рисунок 1. Схема гидродинамической зональности карстовых вод на примере юго-западной части Горного Крыма (на основе схем [3, 6, 16], с дополнениями и изменениями [10]).

*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); IVb – напорных вод с интенсивным 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.

Гидрогеология закарстованных территорий характеризуется ярко выраженной спецификой [7, 9, 19], 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) [9, 11].

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 – важнейшая системообразующая характеристика КВС, определяющая 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 [24]. 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 в Горном Крыму средняя скорость их движения составляет 3350 м/сут.

(140 м/час; 0,04 м/с), причем эту оценку можно считать заниженной вследствие малодискретной регистрации прихода трассеров в пункты наблюдений в большинстве экспериментов и их проведения в периоды низкой и средней обводненности. При доле карстовых территорий в 15 – 25 % от площади крупных регионов, расход карстовых источников составляет 70 – 80 % от совокупного расхода всех источников [24], 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.

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 [10]. 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 фреа-

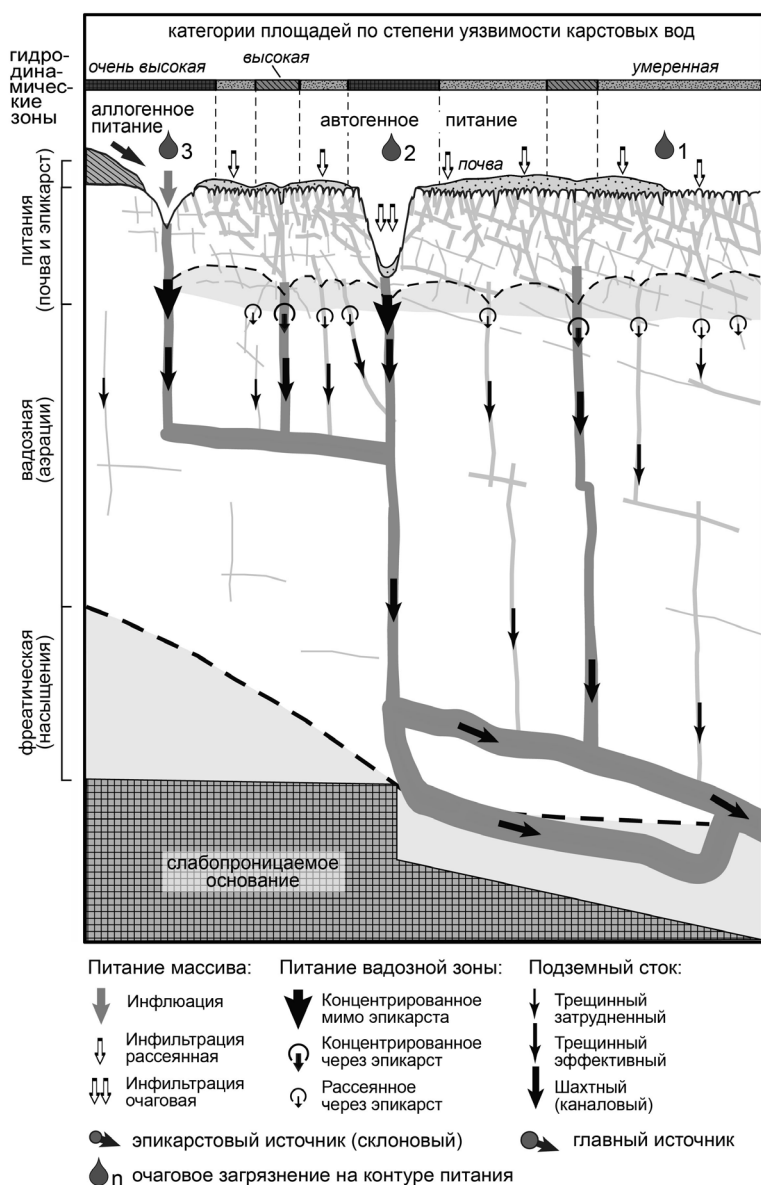


Рисунок 2. Концептуальная модель питания и структуры подземного стока и распределение площадных категорий уязвимости карстовых вод (полоса сверху) в экспонированном карстовом массиве (по [10], с дополнениями)

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  $t_3 < t_2 \ll t_1$

тической 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 карс-

товых массивов играют концентрированные механизмы питания: инфлюация и очаговая инфильтрация. Питание, поступающее в массив этими способами, минуя 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 каналовых систем, способных проводить подземный сток (и, соответственно, загрязнений 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 зон санитарной охраны (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 [1]. ЗСО разделяются на пояса особенного режима, границы которых 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 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 [12] и СНиП 11-31-74 «Нормы проектирования. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения» [2].

Согласно упомянутым документам, ЗСО организуется в составе трех поясов (рис. 3 А):

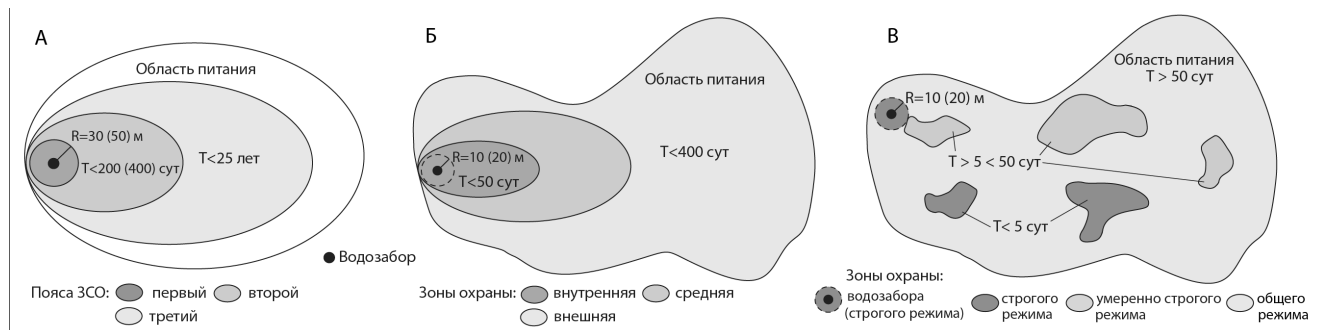


Рисунок 3. Схема определения границ поясов ЗСО для водозаборов подземных вод:

А – согласно нормативной базе Украины, Б – по нормативной базе Словении для поровых/гранулярных коллекторов (по [17]), В – рекомендуемые принципы и критерии установления границ зон охраны для водозаборов подземных вод районов экспонированного карста

Первый пояс (строгий режим) 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.

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, исключающую 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 усилить 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: санитарных, гидрологических и гидрогеологических особенностей источников водоснабжения; различия микробных и химических загрязнений по степени их стабильности в воде подземных и поверхностных источников водоснабжения [13].

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 устанавливается, 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 Европейского Союза 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. [18], 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 (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.

Типичными и показательными являются законодательные нормы Словении, где около 95 % питьевого водоснабжения основано на подземных источниках [17]. Для водозаборов порового/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 А и Б) и используемые 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 фильтрации, редко превышающих 10 м/сут. в таких коллекторах, относительно равномерно, время сквозного прохождения подземных вод увеличивается (а риск поступления с ними загрязнений уменьшается) прямо пропорционально расстоя-

нию от участков инфильтрации в области питания до водозабора.

Однако этот подход является неадекватным в условиях КВС, 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 иллюстрируется ниже 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) [23], 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. эта граница 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 загрязнителей) 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 вре-

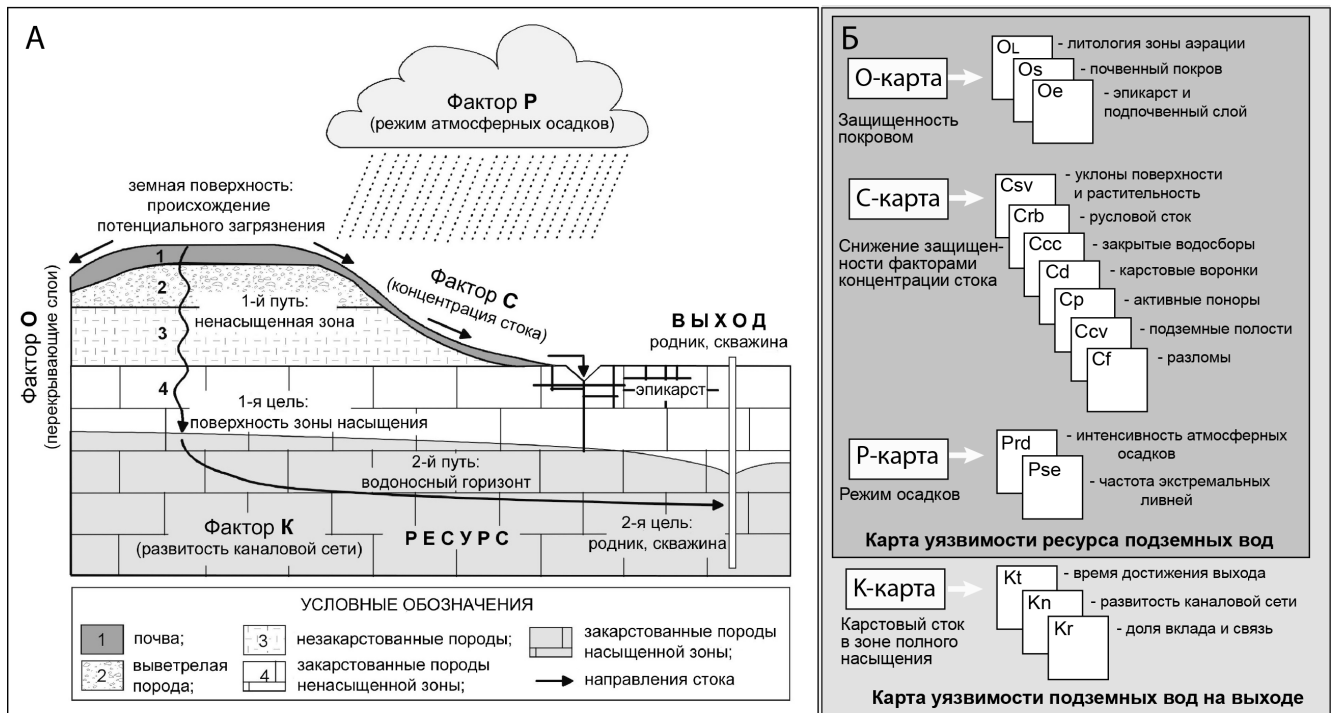


Рисунок 4. А - концептуальная модель распространения загрязнений в системе «происхождение – путь – цель» и факторов уязвимости ресурса и выхода согласно Европейскому подходу (по [25]); Б - пофакторная схема оценки уязвимости карстовых подземных вод согласно «Горно-Крымскому подходу» к оценке уязвимости карстовых вод

мя 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 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 [4, 5, 14] или уязвимости [20, 22] – характеристик, имеющих одинаковый смысл, но обратные значения. Под *уязвимостью* системы подземных вод понимается ее чувствительность к загрязнениям, характеризующая степень развития комплексной барьерной функции верхней части геологичес-

кой среды, определяемая развитостью физических (проницаемость, дисперсивность) и геохимических (сорбция) барьеров [22, 15].

Площадные (региональные, локальные) картографические оценки уязвимости подземных вод являются обязательной основой природо(ресурсо)охранного регулирования хозяйственной деятельности в странах ЕС, США и других. В результате европейской программы COST Action 620 (1996-2004 гг.) был разработан так называемый Европейский подход к оценке уязвимости подземных вод в условиях карста [25], 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);
- 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 А). 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 А – *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 А – *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 каналовых систем и динамических характеристик локализованных потоков в области транзита при оценке уязвимости на выходе.

Все факторы уязвимости подземных вод разделяются на три группы (рис. 4): 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 групп факторов является карта уязвимости ресурса подземных вод, которая различает 5 классов уязвимости: от «очень низкой» до «очень высокой». 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. К ним относятся: время прохождения загрязнителя от места сброса к выходу (Кt), развитость карстовой системы (Кп), вклад отдельных участков водосбора в формирование вод на выходе (Кг). Для их оценки необходимы данные систематических экспериментов по трассированию подземных вод, проводимых на современном уровне.

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 3 В).*

3) При установлении методами трассирования гидравлической связи индивидуальных водозаборов с конкретными участками высокой уязвимости в области питания и времени добегания 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: скважинами и колодцами, каптажными устройствами на карстовых источниках, из рек и водохранилищ, имеющих карстовое питание. 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 водозабором 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), 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.

### Выводы

Ресурсы карстовых подземных вод играют важную роль в питьевом водоснабжении ряда регионов Украины. Карстовые водообменные системы отличаются от водообменных систем в нераст-

воримых породах рядом 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,

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.

### Литература

1. Водний кодекс України // Відомості Верховної Ради України. – 1995. – № 24. – С. 189.
2. 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.
3. Глухов И.Г. Гидрогеологические признаки типов карста Горного Крыма // Новости карстологии и спелеологии. – 1961. – №2. – С. 17-21.
4. Гольдберг В. М. Природные и техногенные факторы защищенности грунтовых вод // Бюлл. МОИП. – 1983. – №2. – С. 103-110.
5. Гольдберг В.М. Взаимосвязь загрязнения подземных вод и природной среды. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 248 с.
6. Дублянский В.Н. Карстовые пещеры и шахты Горного Крыма. – Л.: Наука, 1977. – 180 с.
7. Дублянский В.Н., Кикнадзе Т.З. Гидрогеология карста альпийской складчатой области СССР. – М.: Наука, 1984. – 128 с.
8. Дублянская Г.Н., Дублянский В.Н. Картографирование, районирование и инженерно-геологическая оценка закарстованных территорий. – Новосибирск: СОРАН, 1992. – 144 с.
9. Климчук А.Б. Основные особенности и проблемы гидрогеологии карста: спелеогенетический подход // Спелеология и карстология. – 2008. – №1. – С. 23-46.
10. Климчук А.Б. Эпикарст: гидрогеология, морфогенез и эволюция. – Симферополь: Сонат, 2009. – 112 с.
11. Климчук А.Б. Самоорганизация структуры водообмена как системообразующее свойство карста // Геологический журнал. – 2011. - №1. – С. 85-110.
12. 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.
13. Рекомендации по гидрогеологическим расчетам для определения границ зон санитарной охраны подземных источников хозяйственно-питьевого водоснабжения. – М.: ВНИИ ВодГео, 1983. – 102 с.
14. Роговская Н.В. Карта естественной защищенности подземных вод от загрязнения // Природа, 1976. – №3. – С.57-76.
15. Шестопалов В.М., Богуславский А.С., Бублясь В.Н. Оценка защищенности и уязвимости подземных вод с учетом зон быстрой миграции. – К., 2007. – 120 с.
16. Шутов Ю.И. Некоторые данные по гидрогеологии Горного Крыма // Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии Украины. – М.: Недра, 1971. – С. 41-50.
17. Brenčić M., Prestor G., Kompare B., Matoz H., Kranic S. Integrated approach to delineation of drinking water protection zones // Geologija. – 2009. – № 52 (2). – P. 175-182.
18. Directive 2000/60/EC establishing a framework for Community action in the field of water policy (<http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/>).

19. Ford D., Williams D.W. Karst geomorphology and hydrology. – Boston: Unwin Hyman, 1989. – 601 p.
20. Margat J. Vulnerabilite des nappes d'eau souterraine a la pollution. – Orleans: BRGM Publication 68 SGL 198 HYD, 1968. – 123 p.
21. 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.
22. Vrba J., Zaporozec A. (Eds.). Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability // International Contributions to Hydrogeology, International Association of Hydrogeology, Heise, Hanover, 1994. – v. 16.– 131 p.
23. Worthington S., Ford D. Self-organized permeability in carbonate aquifers // Groundwater. – 2009. – v. 47, № 3. – P. 326-336.
24. 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.
25. 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.

### Транслітерована література

1. Vodnyy kodeks Ukrayiny // Vidomosti Verkhovnoyi Rady Ukrayiny. – 1995. – # 24. – S. 189.
2. Vodosnabzhenie. Naruzhnye seti i sooruzheniya: SNIp 11-31-74 ot 29.04.1974 // Gosudarstvennyj komitet Soveta Ministrov SSSR po delam stroitel'stva. - M.: Strojizdat, 1976. - 146 s.
3. Gluhov I.G. Gidrogeologicheskie priznaki tipov karsta Gornogo Kryma // Novosti karstovedeniya i speleologii. - 1961. - №2. - S. 17-21.
4. Gol'dberg V.M. Prirodnye i tehnoгенные факторы zaschischennosti gruntovyh vod // Byull. MOIP. - 1983. - №2. - S. 103-110.
5. Gol'dberg V.M. Vzaimosvyaz' zagryazneniya podzemnyh vod i prirodnoj sredy. - L.: Gidrometeoizdat, 1987. - 248 s.
6. Dublyanskij V.N. Karstovye peschery i shahty Gornogo Kryma. - L.: Nauka, 1977. - 180 s.
7. Dublyanskij V.N., Kiknadze T.Z. Gidrogeologiya karsta al'pijskoj skladchatoj oblasti SSSR. - M.: Nauka, 1984. - 128 s.
8. Dublyanskaya G.N., Dublyanskij V.N. Kartografirovanie, rajonirovanie i inzhenerno-geologicheskaya ocenka zakarstovannyh territorij. - Novosibirsk: SORAN, 1992. - 144 c.
9. Klimchuk A.B. Osnovnye osobennosti i problemy gidrogeologii karsta: speleogeneticheskij podhod // Speleologiya i karstologiya. - 2008. - №1. - S. 23-46.
10. Klimchuk A.B. `Epikarst: gidrogeologiya, morfogenez i `evolyuciya. - Simferopol': Sonat, 2009. - 112 s.
11. Klimchuk A.B. Samoorganizaciya struktury vodoobmena kak sistemoobrazuyushee svojstvo karsta // Geologicheskij zhurnal. - 2011. - №1. - S. 85-110.
12. Polozhenie o poryadke proektirovaniya i `ekspluatcii zon sanitarnoj ohrany (ZSO) istochnikov vodosnabzheniya i vodoprovodov hozyajstvenno-pit'evogo naznacheniya: SanPiN № 2640-82 ot 18.12.82 // Glavnoe sanitarno-`epidemiologicheskoe upravlenie Ministerstva ohrany zdorov'ya Ukrainy / "Zbirnik vazhlivih oficijnih materialiv z sanitarnih protiepidemichnih pitan". - 1998. - T. 5. - Chast' 2.
13. Rekomendacii po gidrogeologicheskim raschetam dlya opredeleniya granic zon sanitarnoj ohrany podzemnyh istochnikov hozyajstvenno-pit'evogo vodosnabzheniya. - M.: VNII VodGeo, 1983. - 102 s.
14. Rogovskaya N.V. Karta estestvennoj zaschischennosti podzemnyh vod ot zagryazneniya // Priroda, 1976. - №3. - S.57-76.
15. Shestopalov V.M., Boguslavskij A.S., Bublyas' V.N. Ocenka zaschischennosti i uyazvimosti podzemnyh vod s uchedom zon bystroj migracii. - K., 2007. - 120 s.
16. Shutov Yu.I. Nekotorye dannye po gidrogeologii Gornogo Kryma // Voprosy gidrogeologii i inzhenernoj geologii Ukrainy. - M.: Nedra, 1971. - S. 41-50.
17. Brenčič M., Prestor G., Kompare B., Matoz H., Kranic S. Integrated approach to delineation of drinking water protection zones // Geologija. - 2009. - № 52 (2). - P. 175-182.
18. Directive 2000/60/EC establishing a framework for Community action in the field of water policy (<http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/>).
19. Ford D., Williams D.W. Karst geomorphology and hydrology. - Boston: Unwin Hyman, 1989. - 601 p.
20. Margat J. Vulnerabilite des nappes d'eau souterraine a la pollution. - Orleans: BRGM Publication 68 SGL 198 HYD, 1968. - 123 p.
21. 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.
22. Vrba J., Zaporozec A. (Eds.). Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability // International Contributions to Hydrogeology, International Association of Hydrogeology, Heise, Hanover, 1994. - v. 16.- 131 p.
23. Worthington S., Ford D. Self-organized permeability in carbonate aquifers // Groundwater. - 2009. - v. 47, № 3. - P. 326-336.
24. 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.
25. 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.