

На правах рукописи

Токарев Сергей Викторович

**УЯЗВИМОСТЬ КАРСТОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ГОРНОГО КРЫМА
К ЗАГРЯЗНЕНИЮ: ВЫЯВЛЕНИЕ, ОЦЕНКА И КАРТИРОВАНИЕ**

25.00.36 – геоэкология (науки о Земле)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Москва – 2020

Работа выполнена на кафедре землеведения и геоморфологии Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»

Научный руководитель:

Вахрушев Борис Александрович

доктор географических наук, профессор, декан факультета географии, геоэкологии и туризма КФУ им. В.И. Вернадского, заведующий кафедрой землеведения и геоморфологии

Официальные оппоненты:

Кадебская Ольга Ивановна, доктор географических наук, доцент кафедры физической географии и ландшафтной экологии географического факультета ПГНИУ, заведующая Кунгурской лабораторией-стационаром ГИ ПФИЦ УрО РАН

Косицкий Алексей Григорьевич, кандидат географических наук, доцент кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Ведущая организация:

Институт водных проблем РАН

Защита состоится «29» января 2021 г. в 11 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.046.03 при ФГБУН Институт географии РАН по адресу: 109017, г. Москва, Старомонетный переулок, д. 29.

телефон: +7 495 959-00-32, e-mail: d00204603@igras.ru

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в научной библиотеке и на интернет-сайте Института географии РАН: <http://www.igras.ru/defences>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба присылать по указанному адресу Ученому секретарю Диссертационного совета.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат географических наук

Е.А. Белоновская


Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Горный Крым является основной областью формирования водных ресурсов Крымского полуострова. Карстовые воды Горного Крыма формируют более 50% речного стока полуострова, обеспечивают питание крупнейших водохранилищ Крыма и являются основой водоснабжения для населения ряда крупных городов, таких как Севастополь, Симферополь, Ялта, Алушта, Белогорск, Феодосия и Керчь. Для обеспечения сохранения ресурсов карстовых вод Крыма необходимы своевременные меры, первоочередной среди которых является установление эффективного водоохранного режима в пределах областей их формирования. В международной практике в качестве научного обоснования для установления зон охраны подземных вод применяется оценка и картирование их уязвимости к загрязнению. Особенности природных условий отдельных горных регионов, а также уровень их изученности, требуют разработки региональных модификаций методов оценки уязвимости подземных вод, учитывающих эти особенности. Разработка такой модификации для Горно-Крымского региона крайне актуальна. Вместе с этим, общая методология выявления, оценки и картирования факторов уязвимости карстовых вод также требует совершенствования и развития.

Целью данной работы является выявление региональных особенностей формирования карстовых подземных вод Горного Крыма и разработка адекватного научно-методического подхода к оценке и картированию их уязвимости к загрязнению.

В соответствии с поставленной целью решались следующие основные задачи:

- 1) выявление геоэкологических особенностей горно-складчатых карстовых регионов, в частности, Горно-Крымской карстовой области, и определение их следствий для формирования уязвимости подземных вод к загрязнению;
- 2) изучение и анализ существующей общей методологии и частных зарубежных методик оценки и картирования уязвимости карстовых подземных вод, а также опыта их применения;
- 3) проведение геоэкологического анализа условий формирования карстовых подземных вод Горного Крыма и выявление факторов их уязвимости к загрязнению;
- 4) выбор методической основы для оценки и картирования уязвимости карстовых вод, ее модификация и адаптация к природным условиям и уровню изученности карста Горного Крыма;
- 5) создание базы геоданных «Уязвимость карстовых вод Ай-

Петринского массива» и системы для автоматизации процедуры оценки и картирования уязвимости подземных вод;

6) апробация модифицированного метода оценки и картирования уязвимости карстовых подземных вод на примере Ай-Петринского массива, анализ ее результатов и сравнение с результатами, полученными с использованием других методик;

7) разработка рекомендаций по практическому использованию результатов оценки уязвимости карстовых подземных вод.

Объект исследования – карстовые подземные воды Главной гряды Крымских гор.

Предмет исследования – факторы уязвимости карстовых подземных вод Горного Крыма к загрязнению, их картирование и комплексная оценка.

Методология и методы исследования. Теоретико-методологическую основу исследования составили концепция уязвимости (защищенности) подземных вод, которую предложил Ж. Марга и развивали В.М. Гольдберг, Н.В. Роговская, Я. Врба, А. Запорожец; методологические принципы оценки уязвимости (защищенности) подземных вод, разработанные В.А. Мироненко, В.Г. Румыниным, И.С. Зекцером, А.П. Белоусовой, В.М. Шестопаловым, Л. Аллером, С. Фостером; современные представления о гидрогеологии карста, изложенные в работах А.Б. Климчука, В.Н. Дублянского, Д. Форда, П. Вильямса, общая методология геоэкологического анализа и оценки территорий, разработкой которой занимались П.Г. Шищенко, В.А. Боков, В.С. Тикунов, В.Б. Коробов, О.П. Гавриленко, Б.И. Кочуров, И.А. Авессаломова, Л.И. Мухина и другие авторы.

Проанализирован большой объем опубликованных научных работ и фондовых материалов (научно-производственные отчеты, картографические материалы, базы данных). Значительное место в работе занимает блок полевых исследований, послуживший главным источником необходимых фактических материалов. При их проведении использовались методы маршрутных наблюдений и ключевых участков, геоморфологическое картирование, разведка и документирование карстовых полостей, метод стабильных изотопов воды, георадарное профилирование, метод режимных наблюдений за гидродинамическими и гидрохимическими параметрами подземных вод, метод индикаторных экспериментов. В ходе полевых работ изучались и документировались условия питания, движения и разгрузки подземных вод, рассматриваемые в качестве факторов уязвимости.

Широкое применение в работе получили методы ГИС. Для выявления и количественной характеристики некоторых факторов уязвимости использовалось цифровое моделирование рельефа земной поверхности

(ЦМР). Построенные ЦМР подвергались математическому и морфометрическому анализу средствами ГИС, а также визуальному, в том числе, линеаментному анализу. Часть фактических материалов получена посредством дешифрирования космических снимков.

Научная новизна полученных результатов выражается в следующем:

1. Проведен геоэкологический анализ условий формирования карстовых подземных вод Горного Крыма и выявлены факторы их уязвимости к загрязнению в зависимости от условий их питания.

2. Установлено, что известные методики оценки уязвимости подземных вод малоприменимы для условий Горного Крыма.

3. Выполнена модификация и адаптация известных методов оценки и картирования уязвимости карстовых подземных вод к условиям региона.

4. Выполнена оценка и картирование уязвимости карстовых подземных вод представительного района Горного Крыма с использованием различных методов и сравнительным анализом полученных результатов.

5. Разработаны принципы установления зон санитарной охраны для водозаборов карстовых вод в Горном Крыму на основе карты их уязвимости.

Теоретическая значимость. Модифицированная методика оценки уязвимости карстовых подземных вод содержит ряд существенных нововведений в сравнении с аналогичными зарубежными методиками, в том числе методологического плана. Это вносит вклад в развитие общей методологии геоэкологических исследований закарстованных территорий и, в частности, методологии оценки уязвимости карстовых подземных вод.

Практическая значимость. Разработанная методика призвана стать научно-методической основой для организации эффективной охраны ресурсов карстовых подземных вод в Горном Крыму и других, схожих с ним по природным условиям горных карстовых регионах. С учетом высокой ресурсной значимости карстовых вод для Крыма, результаты исследования имеют очевидную практическую ценность. Проведенная оценка уязвимости карстовых подземных вод в пределах массива Ай-Петри подготовила основу для оценки рисков загрязнения подземных вод и организации зон санитарной охраны ресурсов региональной карстовой водоносной системы юго-западной части Горного Крыма, имеющей чрезвычайно высокие значения для водоснабжения полуострова.

Защищаемые положения

1. Для карстовых вод Горного Крыма, с точки зрения их уязвимости к загрязнению, наиболее существенными являются следующие особенности их формирования: 1) высокая неравномерность развития карста, обусловленная литологическим и тектоническим факторами; 2) резкое преобладание

автогенного инфильтрационного питания карстовых вод над аллогенным инфилюационным; 3) доминирующая роль осадков зимнего периода в структуре питания карстовых вод; 4) наличие развитой эпикарстовой зоны, выполняющей важную буферную функцию по отношению к подземным водам.

2. Горно-Крымская методика оценки уязвимости карстовых подземных вод, разработанная на основе существующих европейских методов и имеющая следующие основные нововведения: 1) учет защитной функции эпикарстовой зоны с оригинальной методикой ее оценки, 2) учет факторов подземной концентрации стока разрывными нарушениями и карстовыми полостями, 3) использование плотностного подхода при оценке факторов концентрации стока вместо индивидуального, 4) учет питания карстовых вод за счет таяния снежного покрова.

3. Результаты апробации Горно-Крымской методики оценки уязвимости карстовых вод на примере Ай-Петринского массива показывают крайне дискретный характер распределения категорий уязвимости. В категорию «высокой» (18,6% площади оцениваемого района) и «очень высокой» (7,1%) уязвимости попадают участки голого карста, участки с высокой концентрацией карстовых форм рельефа и тальвеги балок, замыкающиеся на поноры и разрывные нарушения. Ведущую роль в определении категории уязвимости играют фактор литологии зоны аэрации, фактор русловой концентрации поверхностного стока и фактор эпикарста.

4. Установление зон санитарной защиты для карстовых источников питьевого водоснабжения в Горном Крыму должно выполняться с использованием не поясного, принятого в существующих нормативах РФ, а дискретного подхода, на основе карты полной уязвимости подземных вод, полученной с использованием разработанной автором методики.

Личный вклад соискателя. Автором самостоятельно определены цели и задачи исследования, спланированы его этапы, разработана структура работы, собраны исходные данные, проанализирована литература; выбрана, адаптирована и усовершенствована методика оценки уязвимости подземных вод, оформлена графика, сформулированы выводы. В основу работы положен авторский фактический материал, полученный в ходе многолетних (с 2009 г.) полевых работ, включающих опробование атмосферных осадков и подземных вод на изотопный и химический состав (более 500 проб), разведку и топографическую съемку 27 неизвестных ранее карстовых полостей, георадарную съемку эпикарстовой зоны по 9 профилям, 5 экспериментов по трассированию карстовых подземных вод. Автором выполнялись все работы в ГИС, в том числе, оцифровка исходных пространственных данных о

факторах уязвимости, их организация, обработка, анализ и визуализация производных данных, а также построение итоговых карт, ставших основой для научных выводов.

Степень достоверности результатов проведенных исследований. Достоверность результатов исследования обеспечивается большим массивом фактических данных, полученных автором и положенных в основу исследования. Используемые в работе методики оценки уязвимости карстовых подземных вод характеризуются максимальной ясностью и прозрачностью оценочных процедур. Авторская модификация метода оценки и картирования уязвимости карстовых подземных вод одобрена региональными экспертами в области гидрологии и геоэкологии карста, и апробирована на ряде конференций и научных семинаров. Результаты оценки, полученные с использованием разработанной автором методики, хорошо согласуются с существующими представлениями о гидрогеологических условиях региона.

Апробация результатов диссертации. Основные положения и результаты данного исследования были представлены на 12 научных и научно-практических мероприятиях международного, национального и регионального уровней. Среди них XVIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2011» (Москва, 2011), Международная научно-практическая конференция «География: вызовы XXI века» (Симферополь, 2014), Международный симпозиум «Экологическая безопасность и строительство в карстовых районах» (Пермь, 2015), VI Международная научная конференция «Проблемы природопользования и экологическая ситуация в европейской России и сопредельных странах» (Белгород, 2015), I Всероссийская междисциплинарная научно-практическая конференция «Крымская инициатива – Экологическая безопасность регионов» (Симферополь, 2017). Материалы, полученные в ходе исследования, используются автором в преподавании учебных дисциплин «Инженерная геология с основами гидрогеологии», «Географический мониторинг» для обучающихся по направлению подготовки 05.03.02 География в КФУ имени В.И. Вернадского.

Публикации. Результаты исследований опубликованы автором в 24 научных работах общим объемом 17,7 п.л. (авт. – 8 п.л.). В их числе: 7 статей в рецензируемых изданиях из списка ВАК Российской Федерации, 5 статей в прочих специализированных рецензируемых научных изданиях, 13 статей и тезисов докладов конференций, 3 статьи в международных рецензируемых журналах, индексируемых в базе Scopus и Web of Science.

Структура и объем. Диссертация состоит из введения, 5 разделов,

заклучения, списка литературы. Общий объем работы составляет 186 страниц, включая 60 рисунков, 13 таблиц. Список литературы насчитывает 203 наименования, в том числе 68 на иностранных языках.

Соответствие паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 25.00.36 – геоэкология по пункту 1.10 – разработка научных основ рационального использования и охраны водных, воздушных, земельных, рекреационных, минеральных и энергетических ресурсов Земли, санация и рекультивация земель, ресурсосбережение.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность ведущему сотруднику Института геологических наук НАН Украины доктору геологических наук, члену-корреспонденту НАН Украины А.Б. Климчуку, осуществлявшему научное руководство на протяжении большей части выполнения представляемого исследования. Автор искренне благодарен декану факультета географии, геоэкологии и туризма, заведующему кафедрой землеведения и геоморфологии КФУ им. В.И. Вернадского, доктору географических наук, профессору Б.А. Вахрушеву, принявшему руководство данной работой, за помощь в ее завершении и ценные замечания и советы. Автор благодарит своих коллег, сотрудников УМНЦ ИСК и кафедры землеведения и геоморфологии Г.Н. Амеличева, В.Г. Науменко, Е.Г. Амеличева за всестороннюю помощь при выполнении исследования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Геоэкологические особенности горно-складчатых карстовых регионов и методы оценки уязвимости их подземных вод

В главе дается современное определение понятию «уязвимость подземных вод» (вслед за Я. Врбой, А. Запорожцем и В.Н. Шестопаловым) с разделением «собственной уязвимости», которая зависит только от условий территории и геологической среды, и «специфической уязвимости», которая учитывает свойства загрязнителя. Указывается, что уязвимость подземных вод является безразмерной качественной характеристикой, которая, вместе с тем, определяется временем прохождения загрязнителя от места его внедрения на поверхности до тела подземных вод либо их каптажей.

В ходе анализа работ А.Б. Климчука, Д. Форда и П. Уильямса, Дж. Куинлана, У. Уайта, С. Уорсингтона, Дж. Ганна, В.Н. Дублянського, Г.А. Максимовича, посвященных эколого-гидрогеологическим исследованиям горно-складчатых карстовых регионов, выявлены особенности подземных вод карстового типа, имеющие наиболее существенное значение при оценке их уязвимости к загрязнению. К ним относятся:

- высокая пространственная неоднородность и анизотропия емкостных и фильтрационных свойств водовмещающих пород – как следствие, высокая степень концентрации и локализации подземного стока, а вместе с ним и загрязнителей;

- очаговый характер питания и разгрузки подземных вод – как следствие, высокая вероятность прямого попадания загрязнителя в карстовую водоносную систему и его концентрированного выхода в карстовых источниках;

- очень высокие скорости движения подземных вод и, соответственно, загрязнителей при их попадании в водоносную систему – как следствие, высокая скорость продвижения загрязнений к очагам разгрузки;

- низкая сорбционная способность карстующихся пород – как следствие, низкая способность карстовых вод к самоочищению и рассеиванию загрязняющих веществ;

- наличие специфической для карстовых массивов эпикарстовой гидродинамической зоны, которая выполняет буферную функцию по отношению к основным ресурсам карстовых вод;

- высокая изменчивость ландшафтно-топографических условий на поверхности карстовых горных массивов – как следствие, высокая дискретность условий питания карстовых подземных вод.

- снижение уровня загрязнения карстовых вод происходит путем его разбавления в гидродинамической зоне полного насыщения, либо выведением загрязнителей из мобильного состояния на геохимических барьерах (рис. 1).

В данной работе оценка уязвимости подземных вод основывается на модели «происхождение-путь-цель» (рис. 2), разработанной Н. Гольдшайдером и Ф. Цваленом. Согласно ей, уязвимость может оцениваться по защитным свойствам покровной толщи пород на пути от поверхности земли до оцениваемого горизонта («уязвимость ресурса подземных вод»), или по защитным свойствам геологической среды на всем пути от поверхности до выходов подземных вод в водозаборах или источниках, включая свойства водонасыщенной зоны («полная уязвимость выхода подземных вод»). Данная модель положена в основу общей международной методологии («Европейский подход») оценки уязвимости карстовых подземных вод, согласно которой все факторы уязвимости разделяются на 4 группы: факторы перекрывающих слоев (оцениваются через интегральный показатель «О»), концентрации стока (показатель «С»), режима атмосферных осадков (показатель «Р») и развитости карстовой сети (показатель «К») (рис. 2). Показатель «О» отражает защитные свойства перекрывающих слоев, в то время как показатели «С» и «Р» характеризуют степень их редукции за счет

обхода защитных покровов концентрированным стоком и интенсивности выпадения осадков, обуславливающих быстрое продвижение загрязнителей к поверхности зоны насыщения. Данные три показателя используются при оценке уязвимости ресурса подземных вод, а показатель «К», характеризующий гидродинамические условия насыщенной зоны, необходим для оценки полной уязвимости выходов подземных вод.

На базе «Европейского подхода» был разработан ряд частных региональных методик оценки уязвимости карстовых вод, наиболее известные и апробированные из которых (методы «ЕРІК», «СОР», «Словенский») описываются в данной главе. Обосновывается необходимость создания аналогичной методики для Горно-Крымской карстовой области, которая бы в полной мере учитывала региональные особенности условий формирования карстовых вод и максимально использовала имеющиеся о них данные.

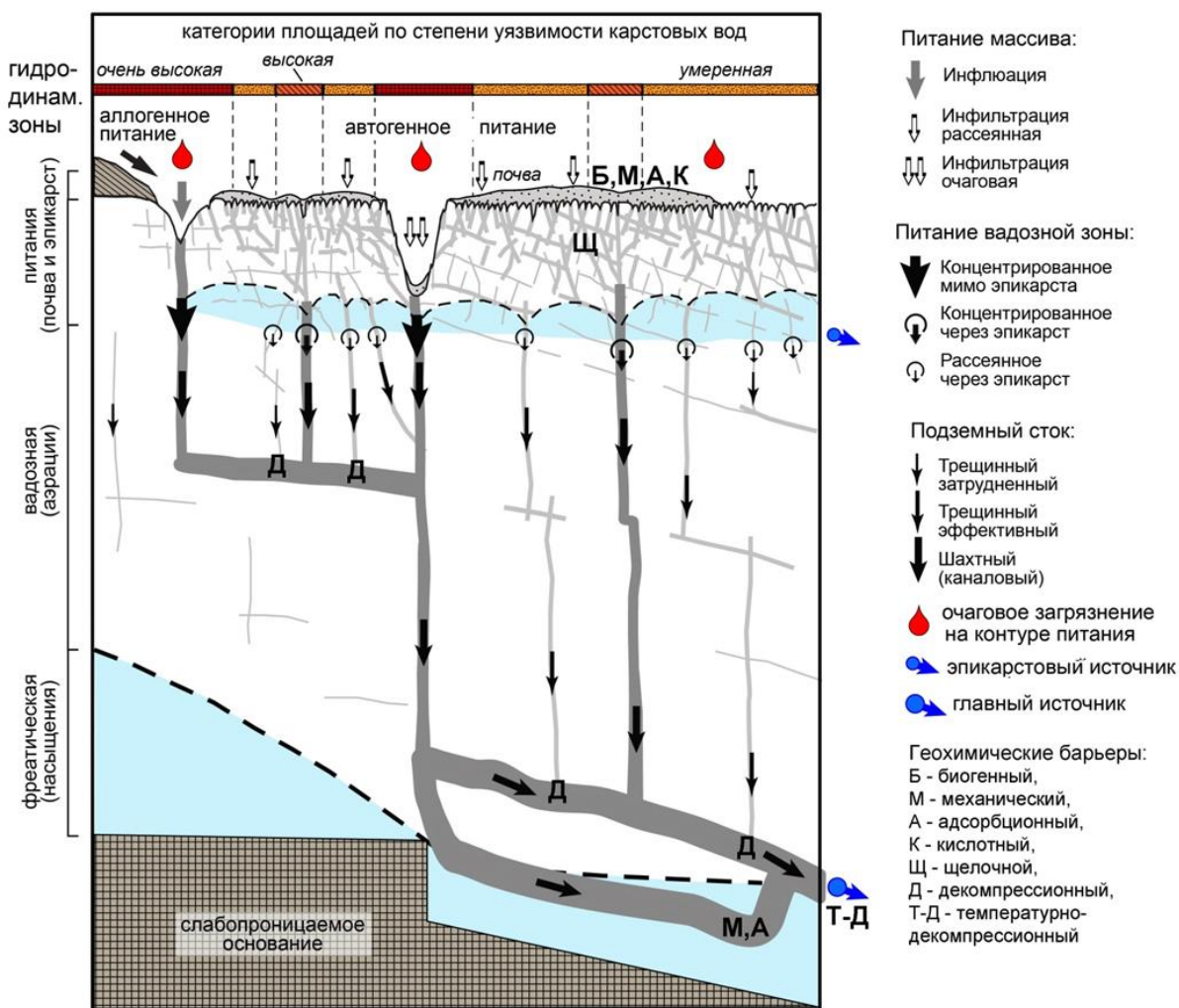


Рис. 1. Концептуальная модель питания и структуры подземного стока и распределение площадных категорий уязвимости карстовых вод в экспонированном карстовом массиве (основа составлена А.Б. Климчуком, геохимические барьеры добавлены автором).

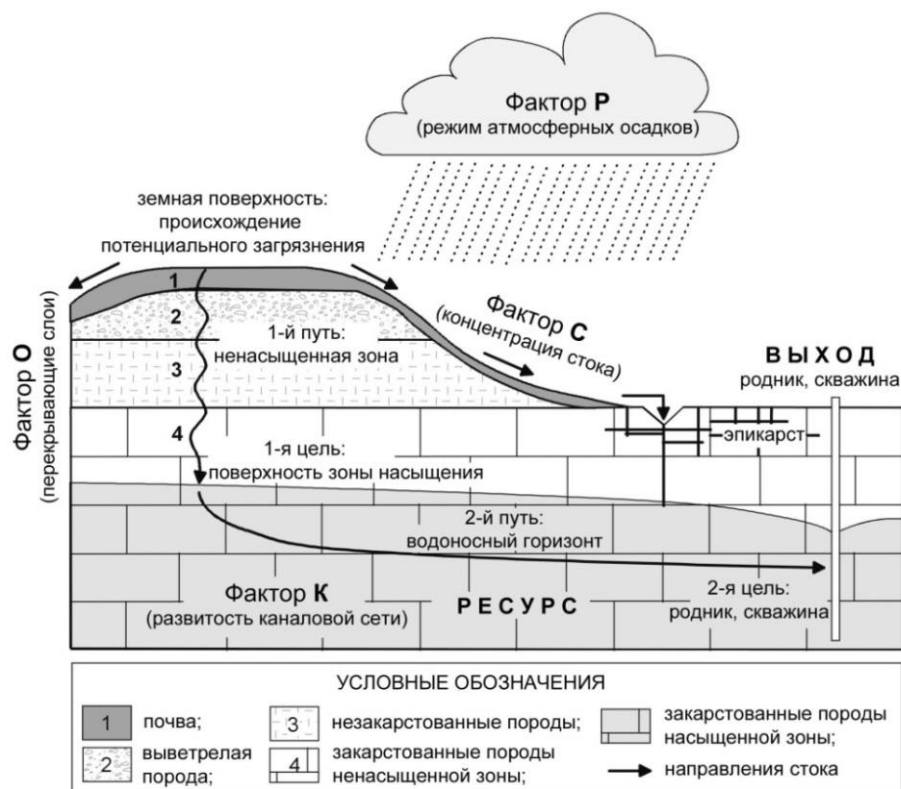


Рис. 2. Концептуальная схема основных факторов уязвимости карстовых подземных вод согласно «Европейскому подходу», разработанному на основе модели «происхождение-путь-цель»
(по Н. Гольдшайдеру и И.К. Попеску, перевод автора).

Глава 2. Выявление и геоэкологический анализ условий формирования подземных вод Горно-Крымской карстовой области

В главе дается характеристика и анализ условий формирования карстовых вод Горного Крыма. Основой для этого послужили как имеющиеся литературные и фондовые источники, так и результаты новейших исследований автора. Последние включают многолетний мониторинг режима и состава атмосферных осадков и карстовых вод (проводится с 2009 г.), оперативный мониторинг режима карстовых вод во время паводковых событий, георадарное профилирование эпикарстовой зоны (9 профилей репрезентативных участков на 2-х карстовых массивах), спелеологические работы (разведка и документирование около 30 неизвестных ранее карстовых полостей), индикаторные эксперименты (выполнено 5 экспериментов по трассированию карстовых вод). Полученные автором данные позволили подтвердить и уточнить ряд известных ранее положений об условиях формирования карстовых вод регионов, а также выяснить некоторые их новые особенности: структуру и буферную функцию эпикарстовой зоны, скорость движения карстовых вод и характер

распространения с ними загрязнителей в условиях различной водности, структуру и режим питания карстовых водоносных систем Ай-Петринского и Долгоруковского массивов.

На основе анализа условий формирования карстовых вод Горного Крыма выявлены их региональные особенности, имеющие принципиальное значение для оценки уязвимости:

1) преобладание безнапорных гидрогеологических условий распространения карстовых вод (в карстовых массивах) с локальным проявлением напорных условий (в межгорных котловинах);

2) высокая интенсивность и, в то же время, неравномерность развития карста, что связано с литологической неоднородностью верхнеюрской толщи, слагающей карстовые водосборы, неравномерным распределением трещиноватости пород, морфологическим отличием поверхности отдельных массивов, разным количеством и режимом осадков в западной и восточных частях Горного Крыма;

3) выраженность платообразных поверхностей массивов с замкнутыми водосборами, играющими роль основной области питания карстовых вод;

4) преобладание автогенного инфильтрационного питания при низкой доли аллогенного инфлюационного питания, что, в первую очередь, связано с хорошей экспонированностью закарстованных пород на поверхности массивов и отсутствием выдержанных слабопроницаемых покровов;

5) высокая мозаичность распределения почвенного покрова, характеризующегося в основном малыми мощностями (до 1 м);

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

7) высокая доля твердых осадков зимнего периода в питании подземных вод, при второстепенной роли жидких осадков теплого периода;

8) практически полное отсутствие точечной инфлюации (известны лишь единичные случаи периодической инфлюации) при широком распространении линейной инфлюации в местах пересечения русел водотоков с зонами тектонической трещиноватости;

9) широкое распространение очаговой инфильтрации в многочисленных карстовых воронках;

10) преобладающий контроль карстового стока тектоническими нарушениями, вдоль которых отмечается максимальная обводненность горных пород;

11) сравнительно низкая антропогенная трансформация природных комплексов Горного Крыма: загрязнение карстовых вод Горного Крыма

носит локальный характер и связано с туристско-рекреационной отраслью, животноводством, автотранспортом, военным и бытовым секторами; наибольшую угрозу представляет бактериальное загрязнение карстовых вод.

Глава 3. Горно-Крымская модификация метода оценки уязвимости карстовых подземных вод

На основе общей европейской методологии и производных из нее частных методов (методы «СОР», «Словенский») нами разработана модификация метода оценки уязвимости карстовых подземных вод для Горного Крыма, методологически усовершенствованная и адаптированная к региональным условиям формирования карстовых вод, учитывающая уровень их изученности и имеющиеся данные о факторах уязвимости (рис. 3).

Методика предназначена для оценки и картирования уязвимости карстовых подземных вод в масштабе 1:50 000 – 1:100 000. Оценка защищенности покровами (О-индекс) включает следующие факторы: почвенный покров (O_s), состав пород зоны аэрации (O_L), эпикарст и подпочвенный слой (O_e). Оценка степени снижения защищенности за счет концентрации стока (С-индекс) включает факторы: русловой сток и инфлюацию (C_{rb}), уклон и растительность (C_{sv}), очаговую инфильтрацию в карстовых воронках (C_d), концентрацию подземного стока карстовыми полостями (C_{cv}), концентрацию подземного стока разломными нарушениями (C_f). Оценка степени снижения защищенности за счет режима осадков (Р-индекс) производится по частоте дней с интенсивным выпадением осадков и дней с экстремальными осадками. Оценка условий миграции загрязнителя в насыщенной зоне (К-индекс) учитывает развитость карстово-каналовой сети (K_n), скорость движения вод (K_t) и характер связи отдельных зон с выходами карстовых вод (K_r).

Усовершенствование и адаптация базовых методов заключается во введении в оценочную схему дополнительных факторов уязвимости, в том числе защитной функции эпикарста (O_e), факторов концентрации подземного стока в зоне аэрации вдоль разломных зон (C_f) и через глубокие карстовые полости (C_{cv}), линейной инфлюации руслового стока в местах пересечений водотоков зонами тектонической трещиноватости (C_{rb}), питания карстовых вод за счет твердых атмосферных осадков (P_{rd} и P_{se}). Также была значительно видоизменена оценочная схема. Так, оценка некоторых факторов концентрации стока была смещена от картирования отдельных элементов (карстовых полостей, воронок, тальвегов периодических водотоков) к оценке через плотность их распределения с учетом значимых индивидуальных характеристик посредством весовых коэффициентов.

15

Определение весовых коэффициентов для нововведенных факторов производилось на основе экспертных мнений по двум критериям: 1) степень влияния отдельных факторов на формирование итоговой уязвимости подземных вод, 2) возможность и точность картирования факторов. Классификационные шкалы и категории итоговых индексов уязвимости взяты из базовых методик без изменений.

Глава 4. Оценка и картирование уязвимости карстовых подземных вод на примере Ай-Петринского массива

В данной главе производится апробация разработанной Горно-Крымской методики оценки уязвимости карстовых подземных вод на территории Ай-Петринского массива площадью 237 км². Район был выбран в связи с его репрезентативностью, сложностью геологического строения, разнообразием условий развития карста, высокой изученностью и хозяйственной освоенностью, большой значимостью в обеспечении региона водными ресурсами.

Процедура оценки уязвимости карстовых подземных вод включала сбор данных по отдельным факторам уязвимости, перевод их в формат пространственных данных ГИС, создание отдельных векторных слоев по каждому из факторов с их атрибутизацией (присвоение оценочных индексов), оверлейные и арифметические операции между ними, ранжирование индексов производных слоев, картографическое представление результатов оценки. Процедура оценки была реализована в виде автоматического программного алгоритма, написанного с использованием модуля «Model Builder» программного пакета ArcGIS 10.

Итоговая карта уязвимости ресурса подземных вод, полученная с использованием Горно-Крымской методики, показала, что в категорию «высокой» и «очень высокой» уязвимости попали соответственно 18,6% и 7,1% площади Ай-Петринского массива (рис. 4). К ним относятся, прежде всего, участки с высокой концентрацией карстовых форм рельефа, тальвеги балок, замыкающиеся на поноры и разрывные нарушения, а также участки голого карста, лишенные почвенно-растительного покрова.

Оценка полной уязвимости выхода подземных вод была произведена на примере карстового источника Хаста-Баш. Согласно полученным результатам, наибольшая концентрация участков с высоким классом уязвимости находится в пределах внутренней зоны области питания оцениваемой карстовой водообменной системы. К ним относятся участки с высокой степенью поверхностной и подземной закарстованности, приразрывные зоны и участки обнажения горных пород (рис. 5).

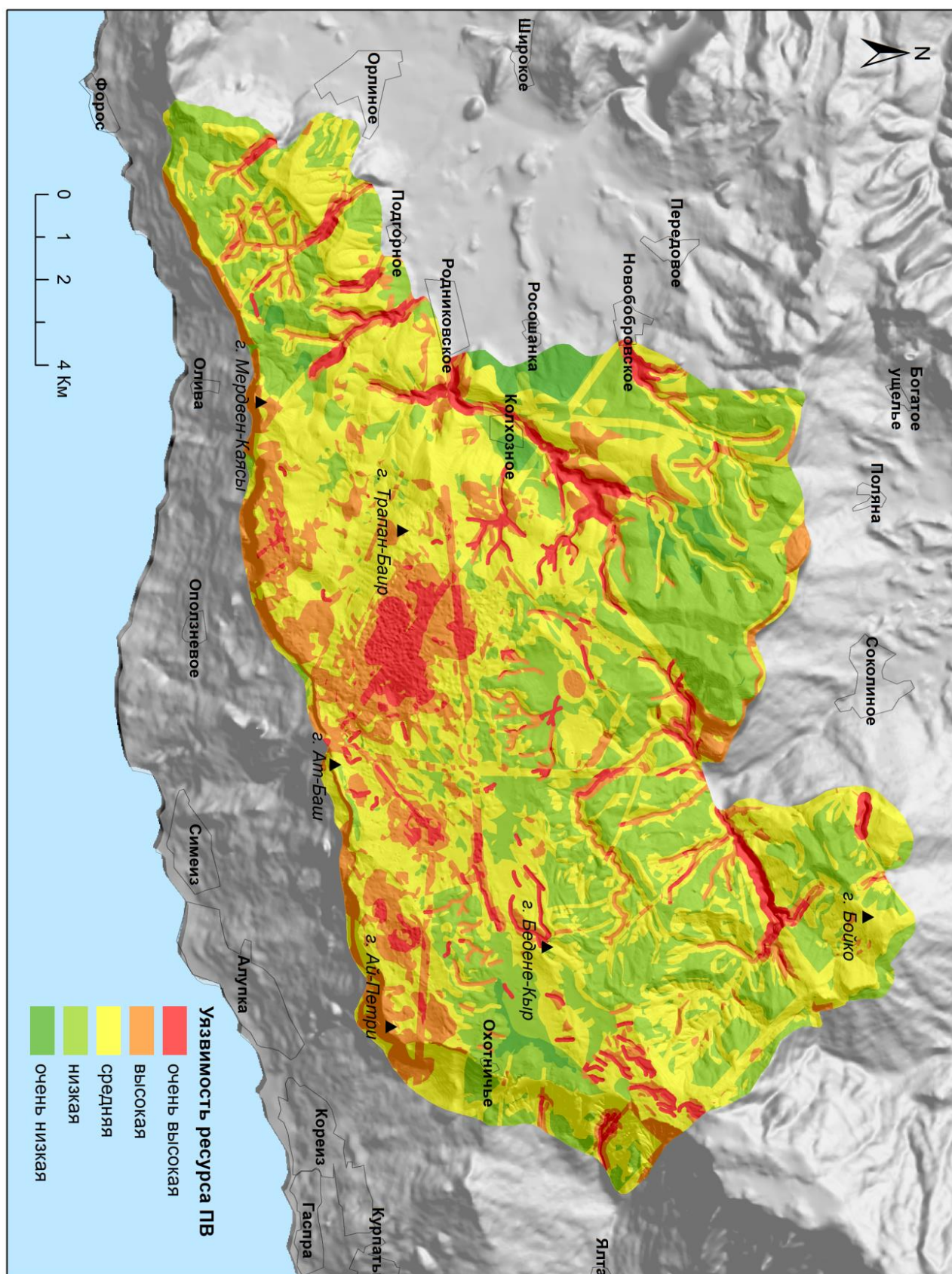


Рис. 4. Результат оценки уязвимости ресурса подземных вод массива Ай-Петри, выполненной с использованием Горно-Крымской методики.

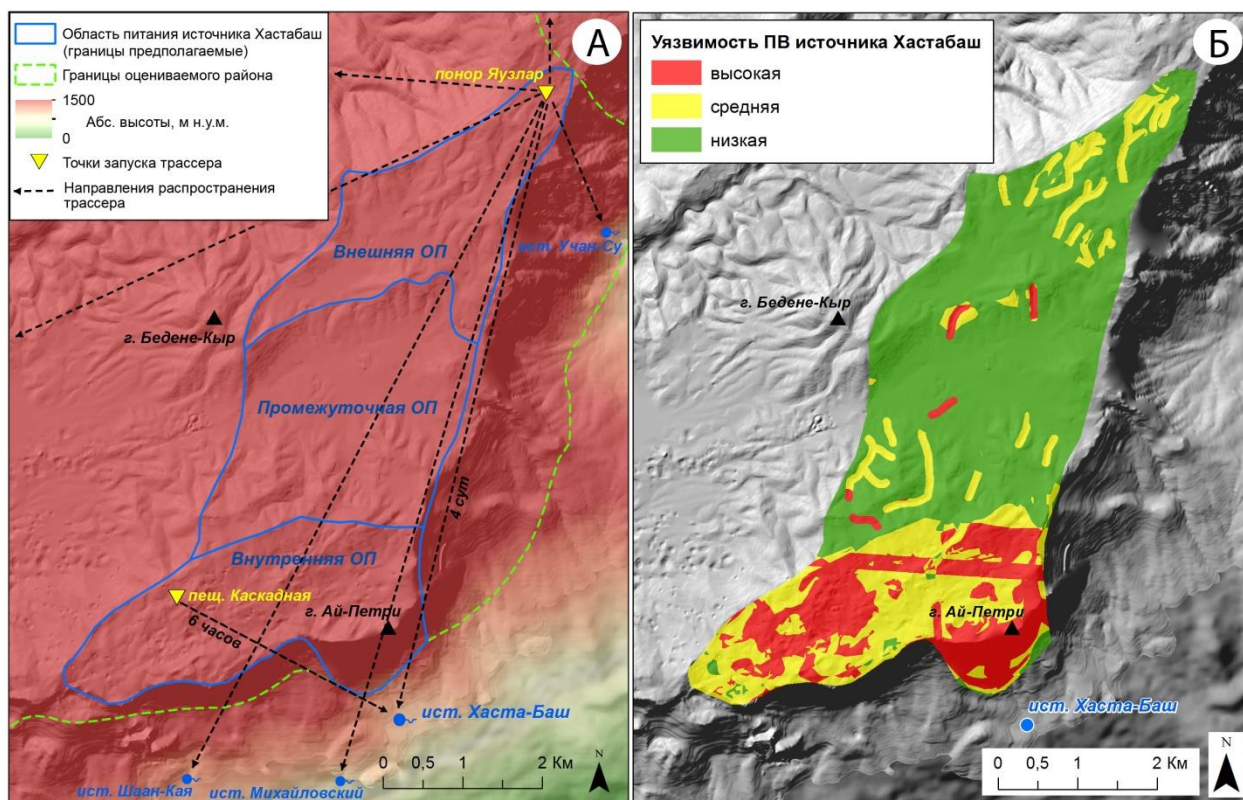


Рис. 5. Результаты оценки полной уязвимости источника Хаста-Баш.

А - Схема подземного стока карстовых вод юго-восточной части Ай-Петринского массива. Б – Итоговая карта полной уязвимости, полученная на основе Горно-Крымской методики.

По результатам оценки уязвимости ресурса карстовых подземных вод Ай-Петринского массива, полученным с использованием Горно-Крымской методики, был проведен анализ их чувствительности к отдельным факторам. Для этого использовалась формула, предложенная И. Бабицером с соавторами:

$$S = \frac{|(V/N) - (V'/n)|}{V} \times 100$$

где S – индекс чувствительности или вариации (отклонения), V и V' – индекс уязвимости, полученный соответственно без устранения и с устранением анализируемого фактора (или нескольких факторов) из расчетной системы, N и n – количество факторов, используемых для расчета V и V' соответственно.

По результатам вычислений (табл. 1) выявлено, что из факторов группы «О» итоговый индекс уязвимости наиболее чувствителен к факторам «О_L» (литология зоны аэрации) и «О_е» (фактор эпикарста и подпочвенного слоя), а из факторов группы «С» – к фактору «С_{гб}» (русловой сток и инфлюация).

Для сравнительного анализа результатов оценки уязвимости подземных

вод, полученных с использованием разных методов, дополнительно была проведена оценка согласно европейским методам ЕРІК и СОР (рис. 6). По результатам оценки с использованием метода ЕРІК категория «высокой» и «очень высокой» уязвимости была присвоена соответственно 35% и 51% площади оцениваемого района. В случае метода СОР это соотношение составило 22% и 23% соответственно. Таким образом, результаты обоих случаев показали значительно завышенную оценку уязвимости подземных вод в сравнении с результатами по Горно-Крымскому подходу, особенно в случае метода ЕРІК. Последний, очевидно, мало пригоден для региональной оценки уязвимости карстовых подземных вод в данном масштабе.

Таблица 1. Статистические показатели индекса чувствительности S для различных факторов уязвимости карстовых вод Ай-Петринского массива

Фактор	S среднее	S максимальное	Стандартное отклонение S
Os	8,8	71,0	14,4
Ol	20,1	83,3	24,7
Oe	15,1	77,8	19,3
Crb	16,4	928,6	79,7
Cf	4,4	103,0	20,6
Cd	7,0	151,0	23,9
Ccv	7,0	151,0	21,0
Csv	5,9	67,0	11,7

Глава 5. Практическое значение результатов оценки уязвимости карстовых подземных вод

В главе проводится анализ действующих в РФ нормативов организации санитарной охраны подземных источников водоснабжения на предмет их применимости к карстовым водоносным горизонтам. Обозначаются основные недостатки данных нормативов: 1) принципы организации санитарной охраны подземных вод основаны на допущении о сплошности фильтрационной среды, что справедливо для коллекторов порового и гранулярного типа, но совершенно не применимо в случае карстовых коллекторов; 2) принята поясная конфигурация зон санитарной охраны, границы которых определяются по изохронам времени достижения потенциальным загрязнителем точки забора подземных вод, что не является адекватным для карстовых водоносных горизонтов, характеризующихся крайне высокой дискретностью водно-коллекторских свойств. В организации

охраны ресурсов подземных вод и водозаборов в карстовых районах мы рекомендуем применение специального подхода, ключевыми особенностями которого являются: 1) выполнение специальной (адаптированной к условиям карста) оценки уязвимости подземных вод к загрязнениям по всей области питания с максимальным учетом региональных особенностей их формирования 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, а также направлений и скоростей движения карстовых вод (рис. 7). Таким образом, в качестве основы для организации зон санитарной охраны карстовых источников питьевого водоснабжения должна выступать карта полной уязвимости подземных вод в пределах их водосборов.

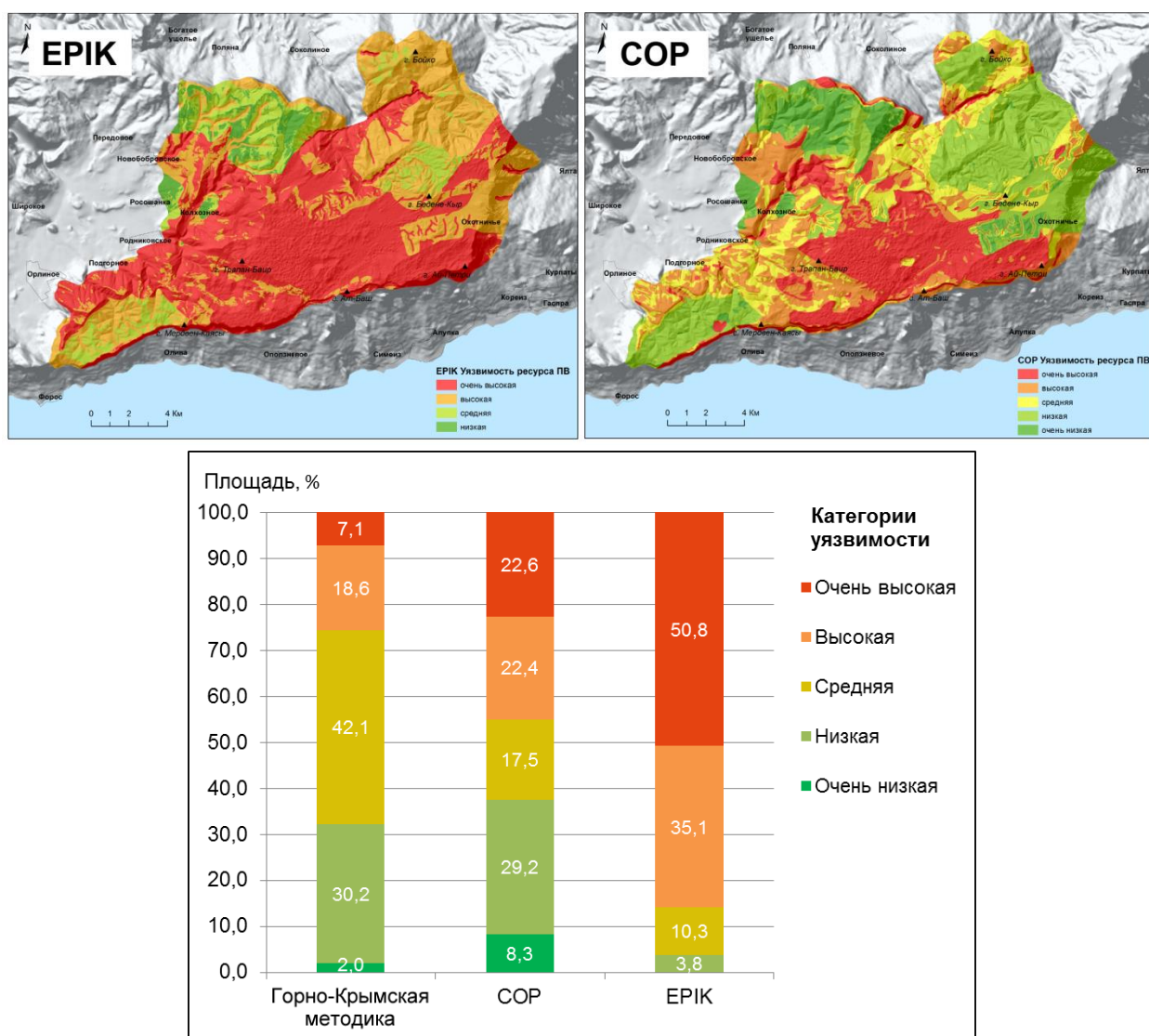


Рис. 6. Результаты апробации методов ЕРИК и COP на Ай-Петринском массиве и соотношение площадей полученных категорий уязвимости подземных вод.



Рис. 7. Предлагаемая концептуальная схема установления границ зон санитарной охраны для водозаборов карстовых вод в Горном Крыму на основе карты полной уязвимости подземных вод.

Выполнена оценка угроз загрязнения подземных вод и связанных с ним рисков с использованием методики, разработанной Д. Де Кетеларе с соавторами в рамках работы Европейской комиссии COST Action 620. Согласно последней, схема оценки рисков загрязнения карстовых подземных вод основывается на оценке собственной или специфической уязвимости с одной стороны, и на оценке угроз загрязнения карстовых подземных вод с другой стороны. Оценка угроз включала в себя процедуры их идентификации, инвентаризации, картографического представления, определения весовых коэффициентов, ранжирования итоговых баллов по уровням угроз с присваиванием соответствующих индексов. Оценка риска загрязнения подземных вод производится путем комбинации карты уязвимости и карты угроз.

Тестовым участком для оценки угроз и рисков загрязнения подземных вод выступила юго-восточная часть Ай-Петринского массива, характеризующаяся наиболее интенсивной хозяйственной освоенностью. Были выделены участки высокого риска ущерба карстовых подземных вод, к которым были отнесены территории жилой и инфраструктурной застройки, животноводческие дворы, фрагменты автодорог, совпадающие с участками высокой степени уязвимости (рис. 8). Результаты проведенной оценки риска необходимо использовать при стратегическом планировании территориальной структуры землепользования в данном районе, а также для оперативного реагирования на последствия техногенных аварий, с целью предотвращения загрязнения подземных вод и связанного с ним ущерба.

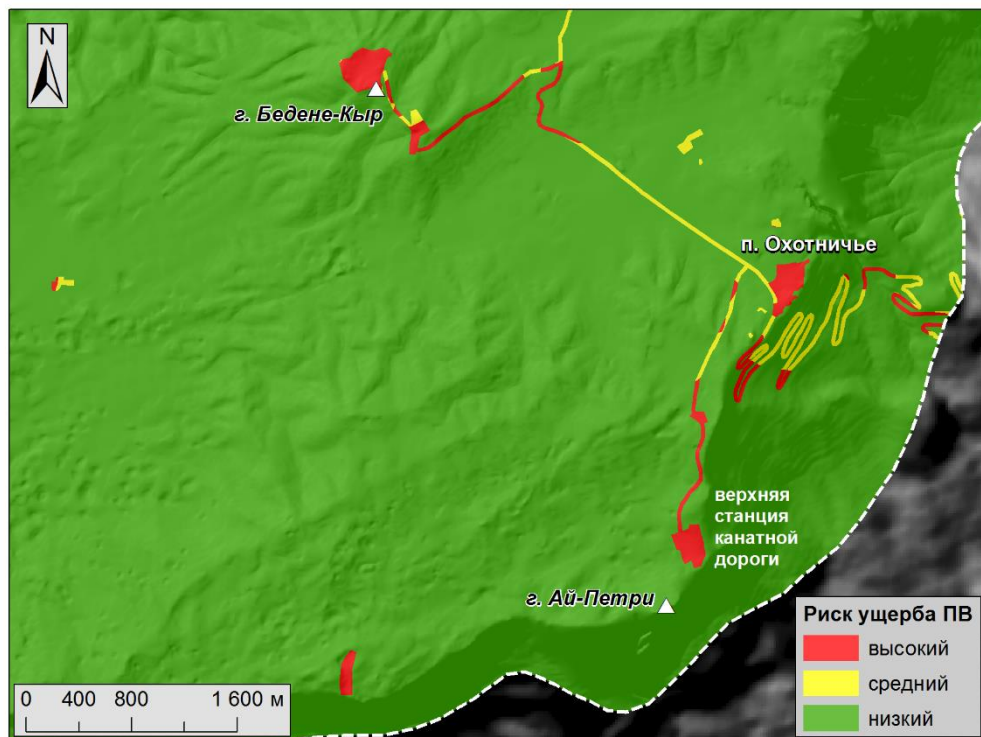


Рис. 8. Результат оценки риска загрязнения подземных вод юго-восточной части массива Ай-Петри.

Заключение

По итогам выполнения диссертационного исследования в определенной степени решены методические и практические вопросы выявления, оценки и картирования уязвимости карстовых подземных вод Горного Крыма к загрязнению и обозначены направления прикладного использования ее результатов. Основными выводами работы являются следующие.

1. В результате проведенного анализа условий формирования карстовых вод Горного Крыма выявлены их региональные особенности, имеющие принципиальное значение для оценки уязвимости, основными из которых являются: 1) преобладание безнапорных гидрогеологических условий распространения карстовых вод; 2) высокая интенсивность и, в то же время, неравномерность развития карста; 3) выраженность платообразных поверхностей массивов с замкнутыми водосборами; 4) преобладание автогенного инфильтрационного питания; 5) мозаичность почвенного покрова; 6) интенсивное развитие эпикарстовой зоны; 7) преобладающая роль твердых осадков зимнего периода в структуре питания подземных вод; 8) отсутствие точечной инфлюации при широком распространении линейной инфлюации; 9) широкое распространение очаговой инфильтрации; 10) преобладающий контроль карстового стока тектоническими нарушениями;

11) сравнительно низкая антропогенная трансформация природных комплексов Горного Крыма.

2. Для оценки уязвимости карстовых подземных вод Горного Крыма была разработана региональная модификация оценочной схемы, которая, с одной стороны, основывается на общепринятой международной методологии и существующих хорошо апробированных частных методах, а с другой - учитывает его региональные особенности и максимально полно использует имеющиеся по ним данные.

3. Разработанная региональная схема оценки уязвимости карстовых подземных вод была апробирована на примере Ай-Петринского массива. Итоговое пространственное распределение категорий уязвимости во всех случаях имеет крайне дискретный характер, что ожидаемо ввиду разнообразия условий формирования карстовых вод. Сравнительный анализ результатов оценки, полученных с использованием Горно-Крымской схемы и наиболее апробированных европейских методик, выявил кардинальные различия между ними, что выражается как в соотношении площадей с различной категорией уязвимости, так и в их пространственном распределении. Очевидно, известные европейские методики являются малоприменимыми для оценки уязвимости карстовых вод в условиях Горного Крыма в масштабе отдельных массивов.

4. Прикладное значение оценки уязвимости подземных вод выражается в использовании ее результатов по двум направлениям. Первое заключается в проектировании зон санитарной защиты источников подземных вод, в случае их использования в хозяйственно-питьевом водоснабжении. Второе состоит в оценке рисков, связанных с загрязнением подземных вод, при разработке генеральных планов развития территорий, сложенных карстующимися породами (в случае перспективного использования подземных вод в водоснабжении). Установление зон санитарной охраны водозаборов карстовых вод предлагается проводить на основе карты полной уязвимости подземных вод: 1-й пояс зоны санитарной охраны (ЗСО) соответствует зонам высокой уязвимости, 2-й пояс ЗСО – зонам средней уязвимости, 3-й пояс – остальной часть карстового водосбора. Таким образом, возникает необходимость закрепления оценки уязвимости подземных вод в составе нормативных документов, регламентирующих первое – порядок организации режима санитарной охраны подземных источников водоснабжения и, второе – проведение экологической экспертизы при проектировании социально-экономических объектов в карстовых районах.

**Основные положения диссертации опубликованы в изданиях,
рекомендованных ВАК РФ и рецензируемых научных изданиях по
списку ВАК Украины, признаваемых в качестве публикаций в
рецензируемых научных изданиях в РФ согласно Постановлению
Российской Федерации от 30.07.2014 г. №723:**

1. **Токарев С.В.** К методике карстолого-геоморфологического картирования посредством использования спутниковых данных о рельефе Земли // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия: География. – 2011 – Т. 24 (63) , № 3. – С. 185-194.

2. **Токарев С.В.**, Климчук А.Б. Развитие Горно-Крымского подхода к оценке уязвимости подземных вод карстовых районов // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2014. – Т. 10, вып. 1. – С. 898-909.

3. Климчук А.Б., **Токарев С.В.** Проблемы охраны источников питьевого водоснабжения в условиях экспонированного карста // Украинский географический журнал. – 2014. – №1. – С. 43-52.

4. Амеличев Г.Н., Тимохина Е.И., **Токарев С.В.**, Амеличев Е.Г., Науменко В.Г. Идентификация гипогенного карста на северном склоне Карабийского массива (Горный Крым) // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Серия «География. Геология». – 2015. – Том 1 (67). № 1. – С. 91-107.

5. Амеличев Г.Н., **Токарев С.В.**, Вахрушев Б.А. Химическая денудация как показатель активизации карста в пределах урбанизированных территорий Крыма (на примере восточной части Симферополя) // Учёные записки Крымского Федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. – 2017. – Том 3 (69). № 1. – С. 177-191.

6. Амеличев Г.Н., **Токарев С.В.**, Токарев И.В. Формирование и режим карстовых подземных вод в бассейне р. Абдалка (Предгорный Крым) // Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. – Том 5 (71). №2. – 2019. – С.202-233.

7. **Токарев С.В.**, Амеличев Г.Н., Токарев И.В. Гидрохимические и гидродинамические особенности карстовых подземных вод юго-восточной части г. Симферополь в условиях антропогенно-нарушенного режима // Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. – Том 5 (71). № 4. – 2019 г. – С. 199-218.

**Статьи в научных изданиях, входящих в системы цитирования Web
of Science и Scopus:**

1. Dublyansky Yu.V., Klimchouk A.B., **Tokarev S.V.**, Amelichev G.N., Langhamer L., Spötl C. Stable isotopic composition of atmospheric precipitation on the Crimean Peninsula and its controlling factors // Journal of Hydrology. –

V. 565. – 2018. – P. 61-73.

2. Dublyansky Yu.V., Klimchouk A.B., **Tokarev S.V.**, Amelichev G.N., Spötl C. Groundwater of the Crimean peninsula: A first systematic study using stable isotopes // *Isotopes in Environmental and Health Studies*. – V. 55, Iss. 5. – 2019. – P. 419-437.

3. Amelichev G.N., Tokarev I.V., **Tokarev S.V.** // Estimation of the formation conditions of the Bishuli thermomineral water (Crimean Lowland) by isotope geochemical methods // *Geochemistry International*. – Vol. 57, No. 12. – 2019. – P. 1355-1359.

В других изданиях:

1. 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.

2. Климчук А.Б., Амеличев Г.Н., Науменко В.Г., **Токарев С.В.** Оценка мощности эпикарстовой зоны по распределению глубин воронок // *Спелеология и карстология*. – 2009. – №3. – С. 26-38.

3. **Токарев С.В.**, Климчук А.Б. К методике оценки уязвимости подземных карстовых вод Горного Крыма // *Материалы Всеукраинской научной конференции с международным участием студентов, аспирантов и молодых учёных «Географические и геоэкологические исследования в Украине и сопредельных территориях», 4-8 апреля 2012 г, Симферополь. – Симферополь: «ДИАЙПИ», 2012 – С. 135-136.*

4. **Токарев С.В.**, Науменко В.Г. Применение спутниковых данных о рельефе Земли в геоморфологическом картировании карстовых районов (На примере массива Ай-Петри, Горный Крым) // *Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій: Збірник наук. Праць (Ворохта, 6-9 вересня 2012 року).* – Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2012. – С. 375-383.

5. Дублянский Ю.В., Климчук А.Б., Амеличев Г.Н., **Токарев С.В.**, Шпётль К. Изотопный состав атмосферных осадков и карстовых источников северо-западного склона Крымских гор // *Спелеология и карстология*. – 2012. – № 9. – Симферополь. – С. 14-21.

6. **Токарев С.В.**, Климчук А.Б. Методология оценки уязвимости подземных вод в условиях раскрытого карста / *Україна: географія цілей та можливостей. Сб.наук.праць.* – Н.: ФОП “Лисенко М.М.”, 2012. – Т.1. – С. 328-331.

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

карстология. – 2014. – № 12. – С. 5-16.

8. Климчук А.Б., Токарев С.В. Оценка уязвимости карстовых подземных вод к загрязнению: Горно-Крымский подход // Карст и пещеры Кавказа: результаты, проблемы и перспективы исследований. Материалы V Региональной научно-практической конференции (г. Сочи, 1-4 ноября 2014 г.). Сочи: Сочинское отделение Русского географического общества, 2014. – С. 177-182.

9. Токарев С.В., Климчук А.Б. Оценка и картирование уязвимости карстовых подземных вод в Горном Крыму (на примере массива Ай-Петри) // Экологическая безопасность и строительство в карстовых районах: материалы Международного симпозиума. Россия, Пермь, 26–29 мая 2015 г. – Пермь, 2015. – С. 337-341.

10. Токарев С.В. Методические аспекты охраны карстовых подземных вод на примере Горного Крыма // Материалы VI Международной научной конференции «Проблемы природопользования и экологическая ситуация в европейской России и сопредельных странах», Белгород, 12-16 октября 2015 г. – Белгород, 2015. – С. 114-120.

11. Токарев С.В. Оценка уязвимости подземных вод как подход к организации охраны природы в карстовых районах (на примере массива Ай-Петри, Горный Крым) // «Заповедники Крыма – 2016: биологическое и ландшафтное разнообразие, охрана и управление». Тезисы VIII Международной научно-практической конференции (Симферополь, 28–30 апреля 2016 г.). – Симферополь, 2016. – С. 167-169.

12. Токарев С.В. Методические подходы к организации охраны карстовых подземных вод в Горном Крыму // Крымская инициатива – Экологическая безопасность регионов: концептуально-теоретические, практические, природоохранные и мировоззренческие аспекты. Материалы I Всероссийской междисциплинарной научно-практической конференции (Симферополь, 5-7 октября 2017 г.). – Симферополь, 2017. – С. 55-59.

13. Токарев С.В. Оценка уязвимости карстовых подземных вод к загрязнению на примере массива Ай-Петри // Вопросы географии. Сб. 147. Спелеология и карстоведение. – 2018. – С. 143-160.

14. Токарев С.В., Амеличев Г.Н., Вахрушев Б.А., Самохин Г.В., Науменко В.Г., Брага Е.В. Движение карстовых вод в условиях низкой водности: результаты новейшего индикаторного эксперимента в Горном Крыму / Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению: сборник докладов международной научной конференции. Санкт-Петербургский государственный университет. – Санкт-Петербург, 2020. – С. 202-207.