

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского»  
(ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»)

На правах рукописи

Токарев Сергей Викторович

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

Специальность: 25.00.36 – геоэкология (науки о Земле)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Научный руководитель  
доктор географических наук, профессор  
Вахрушев Борис Александрович

Симферополь – 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
<b>ГЛАВА 1. ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГОРНО-СКЛАДЧАТЫХ КАРСТОВЫХ РЕГИОНОВ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ УЯЗВИМОСТИ ИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД .....</b>	<b>10</b>
1.1. Особенности гидрогеологии горно-складчатых карстовых регионов и их геоэкологические следствия .....	10
1.2. Использование ресурсов карстовых подземных вод для питьевого водоснабжения .....	20
1.3. Концепция уязвимости подземных вод и ее терминология .....	23
1.4. Методология и существующие методы оценки и картирования уязвимости подземных вод в условиях карста.....	29
Выводы.....	42
<b>ГЛАВА 2. ВЫЯВЛЕНИЕ И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ГОРНО-КРЫМСКОЙ КАРСТОВОЙ ОБЛАСТИ .....</b>	<b>43</b>
2.1. Краткая характеристика природных (фоновых) условий .....	43
2.2. Условия формирования карстовых вод Горного Крыма (по литературным данным) .....	57
2.3. Данные новейших авторских исследований (по результатам полевых работ)	69
2.3.1. Многолетний мониторинг режима атмосферных осадков и карстовых вод .....	69
2.3.2. Оперативный мониторинг режима карстовых вод .....	74
2.3.3. Георадарное профилирование эпикарстовой зоны .....	81
2.3.4. Спелеологические работы .....	85
2.3.5. Индикаторные эксперименты .....	86
2.4. Антропогенная трансформация и загрязнение.....	91
Выводы.....	93

ГЛАВА 3. ГОРНО-КРЫМСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА ОЦЕНКИ УЯЗВИМОСТИ КАРСТОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД .....	95
3.1. Анализ применимости существующих методов оценки уязвимости карстовых подземных вод к условиям Горного Крыма .....	95
3.2. Схема оценки уязвимости карстовых подземных вод согласно Горно-Крымской региональной методике .....	96
Выводы.....	108
ГЛАВА 4. ОЦЕНКА И КАРТИРОВАНИЕ УЯЗВИМОСТИ КАРСТОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ПРИМЕРЕ АЙ-ПЕТРИНСКОГО МАССИВА.....	110
4.1. Общая характеристика условий формирования и факторов уязвимости карстовых вод тестового района .....	110
4.2. Исходные данные и процедура картирования факторов уязвимости карстовых подземных вод.....	116
4.3. Оценка уязвимости карстовых подземных вод с использованием Горно-Крымского подхода.....	118
4.4. Оценка уязвимости карстовых подземных вод с использованием других методов.....	142
Выводы.....	147
ГЛАВА 5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОЦЕНКИ УЯЗВИМОСТИ КАРСТОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД.....	149
5.1. Установление зон санитарной охраны источников питьевого водоснабжения	149
5.2. Оценка угроз и рисков загрязнения подземных вод .....	158
Выводы.....	167
Заключение.....	168
Список сокращений и условных обозначений.....	170
Список использованной литературы.....	171

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** 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.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Работа имеет тесную связь с реализованными научно-исследовательскими темами Таврического национального университета им. В.И. Вернадского (в настоящее время – Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского) «Гидрогеологические свойства эпикарстовой зоны и ее значение для оценки ресурсов и защищенности подземных вод» (2007-2009 гг., гос. рег. № 0109U003260), «Мониторинг динамических параметров среды пещеры Скельская» (2010-2013 гг., гос. рег. № 0111U008967), «Разработка эволюционно-генетического подхода к прикладным проблемам карста» (2013-2014 гг., гос. рег. № 0113U000217), научно-техническими работами КФУ им. В.И. Вернадского «Проведение мониторинга опасных природных процессов, явлений и антропогенного воздействия на среду особо охраняемого геологического объекта «пещера Скельская» (2016-2020 гг.), «Организация системы мониторинга динамических параметров среды пещеры Красная» (2017 г.), «Мониторинг опасных природных процессов, явлений и антропогенного воздействия на среду экскурсионной части пещеры Красная (Кизил-Коба)» (2019 г.). Развитие темы работы продолжалось в рамках реализации инициативного проекта № 19-45-910008 «Развитие экспериментальных методов изучения карстовых водообменных систем на примере Крымского полуострова» (2019-2020 гг.), поддержанных РФФИ и Советом министров Республики Крым. На международном уровне работа выполнялась при взаимодействии с программой ЮНЕСКО «Глобальное исследование карстовых водоносных горизонтов и водных ресурсов» (IGCP 513) и проектом Международной ассоциации

гидрогеологов «Глобальное картирование карстовых водоносных горизонтов».

**Цель и задачи исследования.** *Целью* исследования 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 исследованности 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.

*Объектом* исследования являются карстовые подземные воды Горного Крыма.

*Предметом* исследования являются факторы уязвимости карстовых подземных вод Горного Крыма к загрязнению, их картирование и комплексная оценка.

**Методы исследования.** Теоретико-методологическую основу исследования составили концепция уязвимости (защищенности) подземных вод, разработкой которой занимались Ж. Марга, В.М. Гольдберг, Н.В. Роговская, Я. Врба, А. Запорожец и другие авторы (Margat, 1968, Роговская, 1976; Гольдберг, 1983, 1987; Vrba, Zaporozec, 1994); 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 и другими (Мироненко, Румынин, 1999, Зекцер, 2001, Белоусова и др., 2006, Шестопалов и др., 2007, Aller et al., 1987, Foster, 1987), в том числе в условиях карста (Doerfliger et al, 1999, Goldscheider, 2002, Daly et al., 2002, Zwahlen, 2004); современные представления о

гидрогеологии карста, изложенные в работах А.Б. Климчука, Д. Форда, П. Вильямса и других авторов (Ford, Williams, 1989, 2007; Klimchouk, Ford, 2000, Климчук, 2009, Климчук, 2013), общая методология геоэкологического анализа и оценки территорий (Кочуров, 2003, Методология..., 2000, Авессаломова, 1992, Мухина, 1973, Боков и др., 2012).

В ходе выполнения работы 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. В ходе полевых работ в пределах района исследования изучались и фиксировались условия питания подземных вод, особенности их движения и разгрузки, которые рассматриваются в качестве факторов уязвимости. При этом использовались методы маршрутных наблюдений и ключевых участков, геоморфологическое картирование, спелеологические методы (разведка и документирование карстовых полостей), метод стабильных изотопов воды, гидрохимический (кондуктометрический) метод, георадарное профилирование приповерхностной части разреза карстовых массивов, метод режимных наблюдений за гидродинамическими и гидрохимическими параметрами карстовых подземных вод.

Широкое применение в работе получили методы ГИС. Все собранные пространственные данные о факторах уязвимости подземных вод региона были организованы в базу геоданных «Уязвимость карстовых вод Крыма», входящую в структуру разрабатываемой ГИС «Карст Крыма». 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 анализа 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.

**Практическое значение полученных результатов.** 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. Карта уязвимости является гидрогеологическим обоснованием для зонирования режимов санитарной охраны водозаборов подземных вод. Кроме того, на ее основе производится оценка рисков, связанных с потенциальным загрязнением подземных вод. Таким образом, оценка и картирование уязвимости карстовых подземных вод является эффективным инструментом для территориального планирования водоохранной и хозяйственной деятельности в горных карстовых районах. 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 высокое значения для водоснабжения полуострова.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

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 инфильтрационным; 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), Всеукраинская научная конференция «Географические и геоэкологические исследования в Украине и сопредельных территориях» (Симферополь, 2012), Международная научно-практическая конференция «География: вызовы XXI века» (Симферополь, 2014), VI и VIII Международные научно-практические конференции «Заповедники Крыма» (Симферополь, 2011 и 2015), 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: концептуально-теоретические, практические, природоохранные и мировоззренческие аспекты» (Симферополь, 2017).

**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 диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, 5 разделов, заключения, 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.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую признательность ведущему сотруднику Института геологических наук НАН Украины доктору геологических наук А.Б. Климчуку, осуществлявшему чуткое научное руководство на протяжении большей части выполнения представляемого исследования, за научную школу, идею исследования, методические рекомендации, ценные советы и замечания по ходу работы, без чего она бы не состоялась. Автор искренне благодарен декану географического факультета, заведующему кафедрой землеведения и геоморфологии КФУ им. В.И. Вернадского, доктору географических наук Б.А. Вахрушеву, принявшему руководство данной работой, за помощь в ее завершении, ценные замечания и советы в ходе ее подготовки к защите. Автор благодарит доцента кафедры землеведения и геоморфологии КФУ им. В.И. Вернадского, кандидата географических наук Г.Н. Амеличева за помощь при поиске региональных материалов, советы и критические замечания по работе. Автор благодарит своих коллег, сотрудников УМНЦ ИСК и кафедры

землеведения и геоморфологии Е.И. Тимохину, В.Г. Науменко, Е.Г. Амеличева, А.Н. Гребнева, И.Ф. Трошечкина, Г.Н. Самохина за всестороннюю помощь при выполнении исследования. Автор признателен В.А. Пустовойту и другим сотрудникам ИГН НАНУ за работу по георадарному профилированию в карстовых районах Горного Крыма; крымским спелеологам Б.Э. Матюшкину, И. Перфильеву, С.Ю. Клушину, Ю. Балахтиновой, А. Папию, И.С. Турбанову, С. Кебецу, Ю. Богданенко, О. Перетятко за полезные фактические материалы и помощь при проведении полевых работ; сотруднику Института географии РАН д.г.н. Д.Я. Фашуку за ценные замечания и советы по структуре и содержанию рукописи диссертации.

## ГЛАВА 1

# ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГОРНО-СКЛАДЧАТЫХ КАРСТОВЫХ РЕГИОНОВ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ УЯЗВИМОСТИ ИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

### 1.1. Особенности гидрогеологии горно-складчатых карстовых регионов и их геоэкологические следствия

Поскольку в настоящей работе в качестве объекта исследования выступают карстовые подземные воды, в данном подразделе дается обзор важнейших особенностей гидрогеологии карста как основы для дальнейшего рассмотрения вопросов уязвимости карстовых вод.

Вопросам гидрогеологии карста посвящен ряд фундаментальных научных трудов, что позволяет рассматривать ее как самостоятельное научное направление с собственным набором методов исследования. Среди основных исследователей гидрогеологии карста выделим А.Б. Климчука (Климчук, 1989, 2008, 2009, 2010, 2013, Klimchouk 2004, 2007), Д. Форда и П. Уильямса (Ford, Williams, 1989, 2007), Дж. Куинлана (Quinlan, 1978, 1989, 1996), У. Уайта (White 1999), С. Уорсингтона (Worthington 2000, 2009), Дж. Ганна (Gunn 1985), В.Н. Дублянского (1977, 1984), Г.А. Максимовича (1969).

Современные представления о гидрогеологических особенностях карста наиболее полно изложены в работах А.Б. Климчука и соавторов (Климчук, 1989, 2008, 2009, 2010, 2013, Климчук, Андрейчук, 2010, Klimchouk 2004, 2007, Klimchouk, Ford, 2000). Материалы этих работ были положены в основу данного подраздела.

Гидрогеологические условия карстовых регионов характеризуются целым рядом специфических черт, среди которых центральным является наличие в закарстованных породах каналовой проницаемости. Это особенность приводит к резким различиям в гидрологических и других ландшафтных условиях между карстовыми и некарстовыми геосистемами, что, в конечном итоге, выражается в глубоких различиях их устойчивости к антропогенным воздействиям.

Карст - сложный геологический процесс, происходящий, в зависимости от условий среды, с участием различных элементарных процессов, среди которых основным, инициирующим на разных стадиях прочие процессы, является растворение горных пород природными водами (Климчук, 2010). Развитие карста может происходить в различных природных обстановках, однако оно требует наличия набора условий, четко выделенных уже в середине прошлого столетия Д.С. Соколовым (Соколов, 1951). Таковыми являются растворимость и водопроницаемость горных пород при наличии движущихся вод, способных растворять вмещающие её породы.

Согласно А.Б. Климчуку (Климчук, 2010), карстовый процесс – это «комплексный

геологический процесс, включающий взаимосвязанную совокупность процессов преобразования горных пород, развивающийся под воздействием водообмена, выражающийся в возрастании проницаемости, гетерогенности и анизотропии емкостных, фильтрационных и механических свойств пород, вызванный и направляемый спелеогенезом». Современное определение карста с геосистемно-гидрогеологической позиции дано А.Б. Климчуком и В.Н. Андрейчуком (2010): «карст – это водообменная геосистема в определенном объеме гидролитосферы, возникновение и прогрессивная эволюция которой характеризуются самоорганизацией структуры водопроницаемости с формированием интегрированных систем каналов вследствие действия специфического механизма спелеогенеза, включающего позитивную обратную связь между водообменом и растворением».

По мере развития полостей инициируется и усиливается действие прочих элементарных процессов (суффозии, эрозии, гравитационной деструкции и др.) и возникают различные формы их проявления (провалы, обвалы, просадки и др.). Это происходит как в карстующейся толще, так и в смежных отложениях (особенно перекрывающих). При относительно неглубоком залегании или обнажении карстующихся пород на поверхности образуется специфический карстовый рельеф, в котором доминируют замкнутые формы (воронки, слепые балки и долины). Таким образом, можно говорить о существовании специфического природно-территориального комплекса – карстового ландшафта (или карстовой геосистемы), в формировании которого системообразующую роль выполняет карстовый процесс (Воропай, Андрейчук, 1985). Карст в районах своего развития является важнейшим геоэкологическим фактором, определяющим, в том числе, и степень устойчивости геосистем к внешним воздействиям (Андрейчук, 2007).

Закарстованные породы содержат особый тип подземных вод – карстовые (Дублянский, Кикнадзе, 1984) или трещинно-карстовые воды (Всеволожский, 2007). Карстовые воды организуются в карстовые водообменные системы (КВС) различного масштаба: от систем карстовых полостей, дренирующих изолированные блоки массивов закарстованных пород (например, КВС Красной пещеры), до крупных региональных складчато-надвиговых структур (например, КВС юго-западной части Горного Крыма) и артезианских бассейнов (например, Причерноморский артезианский бассейн). Термин КВС удобен тем, что отражает все разнообразие структур карстовых вод, при этом указывая на их сложный и, в то же время, упорядоченный (системный) характер их строения, функционирования и развития.

Специфической особенностью карстовых коллекторов подземных вод является их многоуровневая пустотность и проницаемость (двухуровневая, иногда - трехуровневая) включающая поровый, трещинный и каналový типы. Расчеты группы зарубежных специалистов (Worthington, Ford, Beddows, 2000) позволяют сделать вывод о вкладе каждого из

типов пустотности и проницаемости в подземный сток карстовых водоносных горизонтов (в безнапорных условиях). При том, что каналовая пустотность обычно составляет всего от сотых долей до первых процентов от общей пустотности, а поровая пустотность обычно составляет более 90 %, водопроницаемость каналов на несколько порядков выше водопроницаемости других сред. Таким образом, именно каналовая проницаемость обеспечивает почти весь (более 90 %) подземный сток карстовых коллекторов. Поэтому для гидрогеологических исследований карстовых районов решающее значение имеет адекватная характеристика каналовой проницаемости, которая может быть достигнута применением комплекса методов, обязательно включающего анализ спелеологических данных, эксперименты по мультитрассированию карстовых вод, инвентаризацию и изучение режима очагов разгрузки. Решающее значение для правильной интерпретации получаемой информации имеет применение современных спелеогенетических концепций (Klimchouk, Ford, 2000).

Гидравлическое взаимодействие каналовых сред со средами других типов в условиях разной водности впервые рассмотрено в работе К. Дрока (Droque, 1980). А.Б. Климчук (Климчук, 2008) отмечает, что описанный К. Дроком механизм нестационарной фильтрации в породах с многоуровневой проницаемостью объясняет многие особенности гидрогеологии карстовых массивов, среди которых:

- разный гидродинамический режим подземных вод, наблюдаемый в близкорасположенных скважинах и источниках;
- различные результаты индикаторных экспериментов (полученные скорости и направления движения вод), проведенных в периоды разной водности;
- несоответствие направлений реальной циркуляции подземных вод линиям тока, получаемым традиционными гидрогеологическими методами, в том числе интерпретацией пьезометрических данных.

Таким образом, при гидрогеологических исследованиях и геоэкологической оценке карстовых водоносных горизонтов неприменимо допущение об их условной сплошности, широко используемое в традиционной гидрогеологии.

#### *Типы карста и их гидрогеологические особенности*

Проявление и развитие карста и, как следствие, строение и функционирование карстовых водообменных систем, характеризуются огромным разнообразием в зависимости от геологических и географических условий и факторов. В связи с этим существует проблема разработки типологической классификации карста, отражающей в своих категориях все его разнообразие и наиболее значимые свойства, в том числе и гидрогеологические особенности.

До недавнего времени в отечественной карстологии наиболее обстоятельной считалась типология карста, предложенная В.Н. и Г.Н. Дублянскими (Дублянский, Дублянская, 1992;

Дублянский, Дублянская, 2004). В качестве самых существенных критериев деления они используют литологию карстующихся пород и характер перекрывающих отложений. Путем совмещения этих двух оснований деления производится типизация закарстованных территорий. Однако, как отмечает А.Б. Климчук (2010), такой формализованный подход удобен при картировании условий развития карста, но не отражает его генезис и собственные существенные свойства.

В развитие идей Б.Н. Иванова (1956), И.Г. Глухова (1961), Дж. Квинлана (Quinlan, 1978) и Р.А. Цыкина (1990), А.Б. Климчуком (Klimchouk, 1996; Климчук, 2010), в том числе в соавторстве с Д. Фордом (Klimchouk, Ford, 2000), была разработана современная эволюционная типология карста. Данная типология рассматривает типы карста в контексте общей геолого-геоморфологической эволюции и гидрогеологического цикла. В ней выделяются следующие эволюционные типы карста: закрытый, приоткрытый, взрезанный, раскрытый, открытый, покрытый, откопанный, погребенный, сингенетический-эогенетический. Раскрытый, открытый и откопанный типы карста находятся в экспонированном состоянии, когда карстующиеся породы выходят непосредственно на дневную поверхность. В дальнейшем в работе будет рассматриваться главным образом карст в экспонированном состоянии, поскольку именно он в большей степени характерен для Горного Крыма.

Эволюционные типы карста характеризуются различным проявлением в рельефе дневной поверхности. Характерной особенностью рельефа в раскрытом и открытом карсте является подавляющее преобладание замкнутых форм, а также недоразвитость эрозионных форм и гидрографической сети ввиду развитого подземного дренажа, что формирует типичный карстовый рельеф. Вследствие сходства поверхностного проявления открытого и раскрытого типов карста, провести разграничение между ними на практике (при картировании типов карста) бывает весьма проблематично (Климчук, 2010).

В контексте темы данной работы, наряду с рассмотренной выше эволюционной типологией карста, уместной является использование так называемой морфолого-генетической типологии Н.А. Гвоздецкого (1988). Им выделяется голый карст (с абсолютным отсутствием покрова, в том числе почвенного) и задернованный (карстующиеся породы имеют лишь почвенно-дерновый или элювиально-почвенный покров), а также переходные формы (полуздернованный и частично задернованный карст). Такой подход, делая акцент на характере покрова, лучше отражает современные условия питания подземных вод.

Кардинальные отличия в условиях питания и циркуляции подземных вод в закрытых и открытых гидрогеологических условиях выражаются в формировании основных генетических типов карста (а вместе с ним, и спелеогенеза), различаемых в последние годы – гипогенного и эпигенного (Klimchouk, Ford, 2000; Klimchouk, 2007; Климчук, 2009; Климчук, 2013).

Гипогенные и эпигенные КВС отличаются по условиям развития: гидродинамическим, гидрохимическим и термальным. Гипогенный карст формируется в закрытых гидрогеологических условиях и, как правило, связан с напорными водоносными комплексами. Эпигенный карст формируется в открытых (безнапорных) гидрогеологических условиях под действием прямого питания с поверхности, главным образом, за счет инфильтрации атмосферных осадков и поверхностных вод. Эпигенно закарстованные породы отличаются крайне высокой неоднородностью и анизотропией водно-коллекторских свойств. Типичные каналовые системы эпигенного происхождения характеризуются невысокой площадной плотностью (в среднем 16 км/км<sup>2</sup>) и небольшими площадными (6,4%) и объемными (0,4%) показателями карстовой пустотности, но при этом проводят практически весь сток водоносных горизонтов, часто на большие расстояния (Климчук, 2010). В зрелых эпигенных каналовых системах средние скорости движения подземных вод измеряются сотнями и тысячами м/сутки. Как правило, для них характерно турбулентное движение. Режим карстовых источников, дренирующих такие системы, отличается большими вариациями расходов.

Горный Крым, за исключением локальных участков (межгорные котловины), в настоящее время является областью развития карста эпигенного типа. Однако, значительная часть активной каналовой пустотности массивов этой области может быть унаследована от гипогенного спелеогенеза, имевшего место в предыдущие этапы геологического развития ГК (Дублянский, 1990, Амеличев и др., 2016).

#### *Гидродинамическая зональность горных карстовых массивов*

В общей гидрогеологии (Всеволожский, 2007) обычно используется двухчленная схема гидродинамической зональности (иногда, трехчленная). В общем случае выделяются зона аэрации и зона полного насыщения. В зарубежной гидрогеологии карста принята аналогичная двухчленная схема деления карстовых массивов, с делением разреза на вадозную зону (англ. vadose zone, безнапорная, со спорадическим обводнением) и фреатическую зону (англ. phreatic zone, напорная, со сплошным обводнением) (Ford, Williams, 2007). В отечественной гидрогеологии карста широкое использование получили более сложные схемы гидродинамической зональности, предложенные Д.С. Соколовым с выделением четырех зон (Соколов, 1962), и Г.А. Максимовичем с выделением 9 зон (Максимович, 1969).

В данной работе в качестве рабочей принята схема гидродинамической зональности, разработанная крымскими карстологами и гидрогеологами И.Г. Глуховым, Ю.И. Шутовым, В.Н. Дублянским, в дальнейшем развитая А.Б. Климчуком (рис. 1.1). В ней выделяются следующие гидродинамические зоны: эпикарстовая, зона аэрации (вадозная), зона сезонных колебаний уровня (эпифреатическая) и зона полного насыщения.

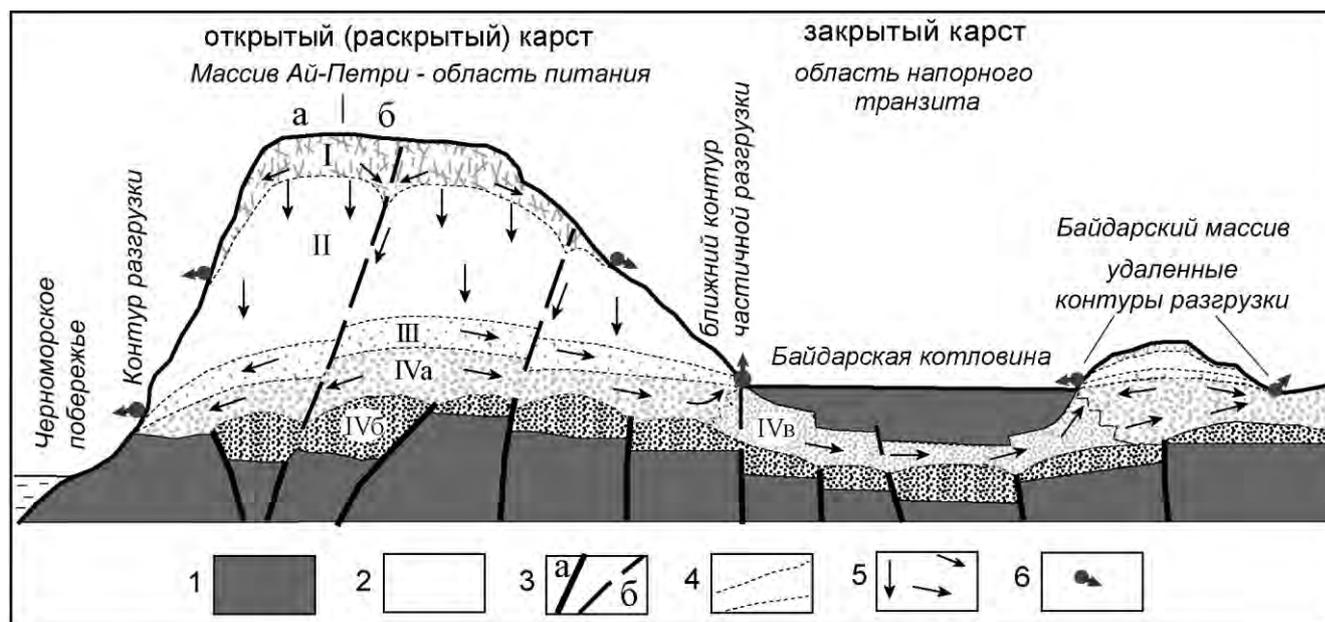


Рис. 1.1. Схема гидродинамической зональности карстовых вод на примере юго-западной части Горного Крыма (составлена А.Б. Климчуком (Климчук и др., 2007) на основе схем И.Г. Глухова (1961), Ю.И. Шутова (1971) и В.Н. Дублянского (1977), с дополнениями автора в части надписей).

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.

Карстовые массивы: а - цокольные приморские, б – склоновые континентальные. Гидродинамические зоны: I – эпикарстовая (преимущественно рассеянное питание; безнапорные воды, образующие подвешенный горизонт); II – аэрации (вадозная - преимущественно нисходящее свободное движение вод по трещинам и каналам); III – сезонных колебаний уровня (эпифреатическая; перемежающиеся условия зон II и IVа); IV – зона полного насыщения; подзоны: IVа – преимущественно безнапорных вод открытого карста с интенсивным водообменом, с локальным напором в каналах (фреатическая); IVб – напорных вод с замедленным водообменом; IVв – напорных вод (артезианского напора) закрытого карста с интенсивным водообменом.

Районы открытого и закрытого карста характеризуются принципиально различными условиями питания и гидродинамическими профилями. Различные типы карста часто образуют смежные зоны. На рисунке 1.1 приведен типичный гидрогеологический разрез Горного Крыма, где в тектонически погруженных блоках (Байдарская котловина) развивается закрытый карст, а на цокольных массивах Главной гряды (Ай-Петри) представлен карст открытого типа. В открытом карсте присутствуют все гидродинамические зоны, тогда как в закрытом карсте

представлена только одна зона – полного насыщения, подзоны напорных вод.

На рисунке 1.2 детализируется схема гидродинамической зональности и подземного стока эпигенной КВС (открытый и раскрытый карст), соответствующая условиям карстовых массивов Горного Крыма.

Для горных массивов открытого карста общеприняты представления о том, что формирование карстовых вод верхней части зоны аэрации связывается с тремя видами питания: инфильтрационным (рассеянное проникновение в почву и породу атмосферной воды и склонового стока), инфлюационным (проникновение в породы сосредоточенного стока) и конденсационным (конденсация на стенках каналов и трещин внутри массива). Инфлюационное питание представляет собой прямой вклад в концентрированный (шахтный, каналовой) сток в карстовой системе и быстро достигает водонасыщенной зоны. Инфильтрационное питание разделяется на компоненты быстрой и медленной фильтрации при прохождении через эпикарстовую зону. Конденсационное питание формируется в трещиноватой приповерхностной зоне (эпикарсте) карстовых массивов и внутри карстовых полостей, играя второстепенную роль в общем питании. Возможна дальнейшая дифференциация видов питания, позволяющая выделять площадную, линейную и очаговую инфильтрацию (Дублянский, Кикнадзе, 1984, Дублянский и др., 1985).

Эпикарстовая зона, в сравнении с другими гидродинамическими зонами, характеризуется более равномерной и высокой проницаемостью и значительными емкостными свойствами. Она получает главным образом инфильтрационное питание, имеет изменчивую мощность в пределах от первых метров до десятков метров и содержит безнапорные воды, обычно образующие подвешенный водоносный горизонт, дренируемый в нижележащую зону аэрации как крупными трещинами и шахтами (зонами быстрой фильтрации), так и мелкими трещинами. Эпикарстовый водоносный горизонт может отсутствовать на участках слабовыраженных различий в проницаемости приповерхностной и нижележащей зон массивов. Эпикарстовая зона имеет изменчивые запасы и играет регулирующую роль в режиме карстовых водообменных систем, задерживая и распределяя инфильтрационное питание с поверхности. В пределах эпикарстовой зоны происходит разделение площадной инфильтрации на две компоненты на входе в нижележащую зону аэрации: быстрой фильтрации (воды, дренируемые из эпикарстового горизонта крупными трещинами и нарушениями, обычно преобразованными в подэпикарстовые шахты) и медленной фильтрации (воды, дренируемые из эпикарстового горизонта мелкими трещинами) (рис. 1.2). Морфогенетические процессы эпикарста являются определяющими в образовании карстовых воронок на поверхности, которые однозначно связаны с зонами быстрой фильтрации. Поэтому очаговая фильтрация в карстовых воронках идет на формирование компоненты быстрой фильтрации в зоне аэрации (Климчук, 1989, 2009).

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

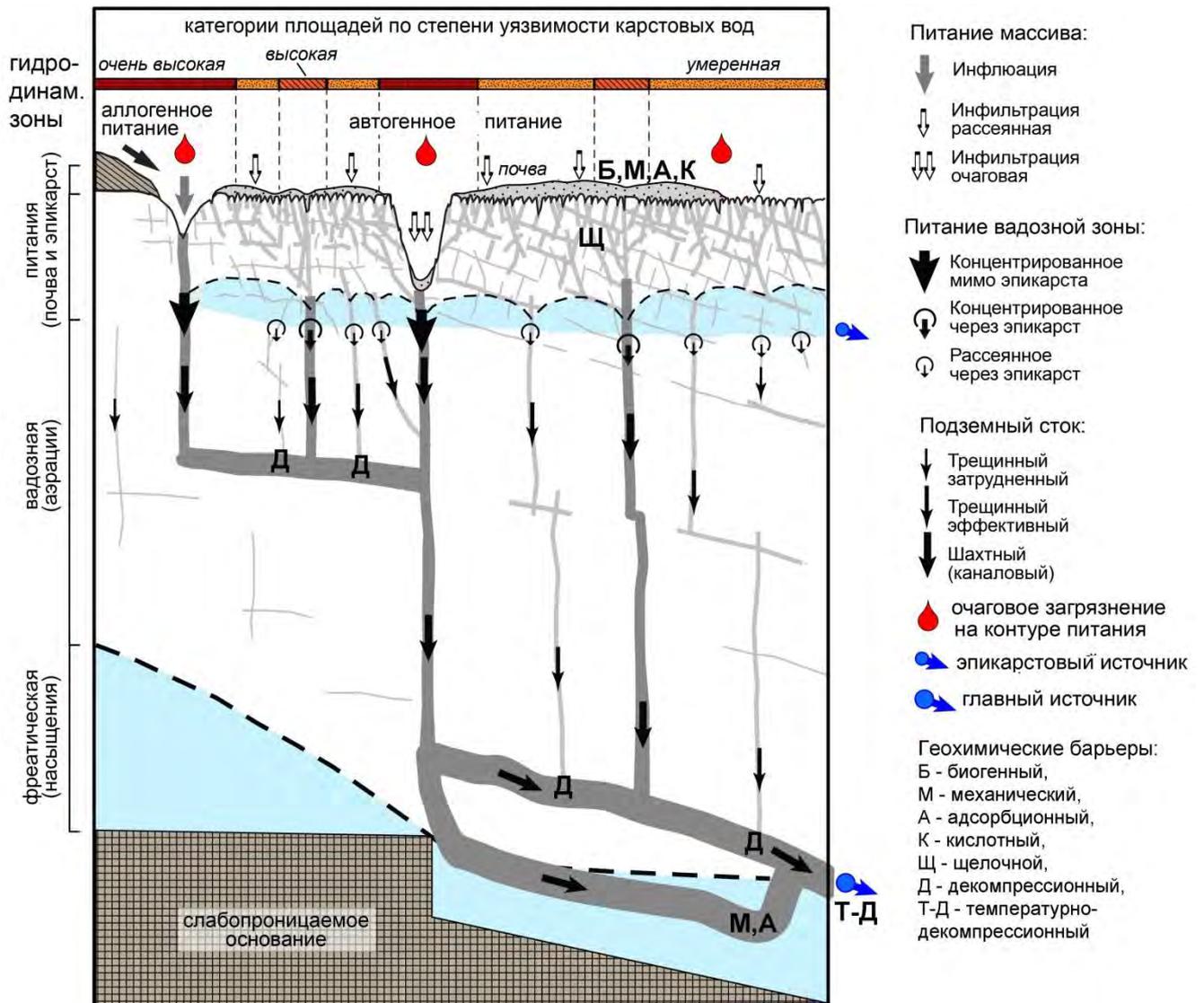


Рис. 1.2. Концептуальная модель питания и структуры подземного стока и распределение категорий уязвимости карстовых вод (полоса сверху) в экспонированном карстовом массиве (Климчук, Токарев, 2014) с добавлением автором геохимических барьеров.

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

Гидродинамические свойства зоны полного насыщения (фреатической зоны) в районах

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

#### *Геоэкологические следствия особенностей гидрогеологии карста*

Специфической особенностью карстовых геосистем является ярусность их вертикальной структуры, выражающаяся в наличии наземной и подземной подсистем. Последнюю составляют подземные полости, которые ряд авторов относят к самостоятельным природным образованиям – подземным территориальным комплексам или ландшафтам (Чижишев, 1987, Гергедава, 1980). Эта особенность, по мнению некоторых авторов (Воропай, Андрейчук, 1985, Проскурняк, Андрейчук, 1998), обуславливает основные системные свойства карстовых ландшафтов, отличающие их от некарстовых ландшафтов, в том числе целостность, динамику, устойчивость и саморегуляцию.

Поскольку карстовые геосистемы имеют более сложную вертикальную структуру, чем некарстовые геосистемы, существует мнение, что структурная предпосылка устойчивости к внешним воздействиям у первых выше, чем у вторых. Это мнение высказано Л.И. Воропаем и В.Н. Андрейчуком (Воропай, Андрейчук, 1985). Оно обосновывается тем, что воздействие факторов внешней среды на одну подсистему (ярус) опосредуется другой, смягчающей силу этого воздействия. Таким образом, можно говорить о буферной устойчивости карстовой геосистемы. Те же авторы отмечают, что устойчивость, как и многие другие свойства карстовых геосистем, определяется характером водных потоков в них. Поэтому при решении вопросов управления карстовыми геосистемами основным объектом внимания должен стать гидрокомпонент, как наиболее чувствительный к воздействиям компонент геосистемы. Достаточность монокомпонентной – водной – регуляции относительно упрощает процесс управления геосистемой.

Мы абсолютно согласны с вышеуказанной позицией авторов об определяющей роли водных потоков в саморегуляции карстовых геосистем. Однако вывод о большей буферной устойчивости карстовых геосистем, в частности, их водного компонента, по отношению к внешним воздействиям, в сравнении с некарстовыми геосистемами, нам представляется спорным. В особенности это касается устойчивости к химическим и микробиологическим загрязнениям карстовых вод.

Средняя скорость движения подземных вод в карстовых канальных системах измеряется

тысячами метров в сутки. По данным 8000 трассерных экспериментов в различных регионах мира средняя скорость движения карстовых вод составила около 2000 м/сут (Worthington, Ford, 2009). В Горном Крыму по результатам 35 трассерных экспериментов она составила 3350 м/сут (Дублянский, Кикнадзе, 1984). Это на несколько порядков выше скорости движения подземных вод в некарстовых коллекторах. Вследствие высоких скоростей движения и низкой сорбционной способности карстующихся пород карстовые водообменные системы отличаются крайне низкой способностью к самоочищению от загрязнителей.

Характерная для КВС развитая каналовая сеть обеспечивает высокую степень локализации и концентрации подземного стока, а вместе с ним и загрязнений, от области питания к очагам разгрузки. В случае инфлюационного питания локализация загрязнителя может происходить уже на входе в КВС с его дальнейшим быстрым продвижением и выходом из карстовых источников в концентрированном виде. С другой стороны, в случае точечного загрязнения, при концентрации подземного стока происходит разбавление загрязненной воды с уменьшением концентрации загрязнителя. При попадании загрязнителя в КВС его полное выведение из последней может занимать довольно длительное время. Так, при проведении экспериментов по трассированию карстовых вод полный выход из системы красителя, который является аналогом органического загрязнителя, часто занимает от нескольких до 10 лет.

В системе подземного стока карстовых массивов можно обозначить следующие геохимические барьеры и процессы, направленные на снижение уровня загрязнения подземных вод (рис. 1.2). При прохождении через почвенный горизонт происходит поглощение загрязнения растительностью и микроорганизмами (биогенный барьер), сорбция органическим веществом и глинистыми минералами (адсорбционный барьер), подкисление воды за счет растворения почвенного  $\text{CO}_2$  (кислотный барьер – приобретение водой агрессивности), в глинистых почвах – механический барьер. В эпикарстовом горизонте происходит нейтрализация агрессивности воды, сопровождающаяся растворением породы и насыщением карбонатами (щелочной барьер), а также может иметь место дисперсия загрязнения в подвешенном водоносном горизонте. При попадании стока из эпикарста в вадозную зону наблюдается осаждение карбонатов на декомпрессионном барьере (резкое падение парциального давления  $\text{CO}_2$  в воздухе). Во фреатической (насыщенной) зоне наблюдается резкое падение скорости движения ПВ, сопровождаемое дисперсией, осаждением взвесей (механический барьер), сорбцией донными глинистыми отложениями (сорбционный барьер). На выходе карстовых вод на поверхность обычно имеет место температурно-декомпрессионный барьер (резкое изменение окружающей температуры и падение парциального давления  $\text{CO}_2$  в воздухе), приводящий к осаждению карбонатов в виде травертина.

Существенным фактором, препятствующим попаданию загрязнений в КВС, является развитость эпикарстовой зоны массивов, выполняющей буферные функции по отношению к подземным водам вадозной и фреатической зон. Прохождение инфильтрационных вод через нее в зону аэрации может составлять от 1-2 недель до нескольких месяцев, хотя интенсивное выпадение осадков может вызывать быстрое "поршневое" выдавливание вод из эпикарстового горизонта в крупные трещины и каналы, обуславливая прохождение пульсационной волны и паводковый сигнал на источниках (Климчук, 2009). В последнем случае, при наличии в эпикарстовой зоне аккумулярованных загрязнений, на выходах карстовых вод может произойти резкий подъем их концентрации.

Карстовые водосборы, в особенности в горной местности, характеризуются крайне высокой дискретностью условий питания подземных вод. Последняя обуславливается высокой пространственной изменчивостью ландшафтно-топографических условий (мезорельефа, гидрографической сети, мощности почвы, типа растительности), свойственной поверхностям карстовых массивов. Например, на небольшой площади могут сочетаться водораздельные участки с карровыми полями, воронки с мощным почвенным покровом и густой растительностью, овраги временных водотоков с понорами, участки выходов слабокарстующихся пород и т. д. Соответственно, способность отдельных участков к задержке и переработке загрязнений также будет очень сильно варьировать. Поэтому, при решении вопросов использования и охраны карстовых вод первостепенно важным является учет дискретности условий их питания, для чего необходимо проводить детальную дифференциацию водосбора по ландшафтно-топографическим условиям.

## **1.2. Использование ресурсов карстовых подземных вод для питьевого водоснабжения**

Согласно глобальным оценкам, представленным в работе Д. Форда и П. Уиллиамса (Ford and Williams, 2007), карст развит на 7-12 % суши Земли, при этом около четверти населения планеты в значительной мере или полностью зависит от ресурсов карстовых подземных вод (КПВ). В некоторых странах (Австрия, Словения, Хорватия, Бельгия, Словакия, Франция, Италия) и крупных регионах (юго-западный Китай, штаты Техас и Флорида в США) доля КПВ в общем питьевом водопотреблении составляет 25-50 % и более (COST Action 65, 1995). Полностью или преимущественно за счет карстовых вод снабжаются отдельные крупные города: Сан-Антонио (1,4 млн. жителей), Вена (1,8 млн.), Рим (2,9 млн.), Дамаск (6-7 млн.) (Chen et al., 2017). Осознание мировой научной общественностью высокой значимости ресурсов карстовых вод и их чувствительности к истощению и загрязнению, активно происходившее в последние пару десятилетий, выразилось в организации ряда международных проектов и издании коллективных монографий. Кроме упомянутых в Главе 3 К таким проектам в первую

очередь, следует отнести программу ЮНЕСКО «Глобальное исследование карстовых водоносных горизонтов и водных ресурсов» (IGCP 513), проект Международной ассоциации гидрогеологов «Глобальное картирование карстовых водоносных горизонтов» (Chen et al., 2017), программы Европейской Комиссии COST Action 65 (1995) и COST Action 620 (2003). Из новейших фундаментальных коллективных работ, посвященных проблемам рационального использования КПВ, следует выделить монографии под редакцией З. Стевановича (Karst Aquifers - Characterization and Engineering, 2015) и Б. Андрео и других (Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems, 2015).

На Крымском полуострове карстующиеся карбонатные породы обнаружены под 84 % его площади (Дублянский, Дублянская, 1996). Они содержат подавляющую часть всех ресурсов пресных подземных вод полуострова, составляющую по грубым оценкам не менее 80 %. Карстовые коллекторы ПВ полуострова относятся к двум гидрогеологическим структурам 1-го порядка: гидрогеологической складчатой области Горного Крыма и Причерноморскому артезианскому бассейну (Шестопапов и др., 2010). В гидрогеологической области Горного Крыма практически все ресурсы подземных вод содержатся в интенсивно закарстованных карбонатных породах верхнеюрского и, частично, нижнемелового возраста. Формирование вод здесь происходит исключительно автогенным механизмом, за счет выпадающих осадков в пределах открытых карстовых водосборов Главной гряды. Большая часть ресурсов ПВ ГК разгружается на поверхность через карстовые источники на склонах массивов, откуда берут начало крупнейшие реки полуострова: Черная, Бельбек, Салгир, Биюк-Карасу, Кача, Альма. По оценкам И.Г. Глухова и Н.И. Дрозда карстовое питание рек Главной гряды Крымских гор составляет более 50% от их общего стока (Ведь, 2007). На этих реках с преимущественным карстовым питанием сооружены водохранилища для питьевого водоснабжения городов в наиболее густонаселенных предгорной и южнобережной частях полуострова: Симферополя, Севастополя, Ялты, Белогорска, Алушты, Алупки, Бахчисарая. Водозаборы также сооружены непосредственно на многих крупных карстовых источниках, выходящих на южных склонах Главной гряды: источники Хаста-Баш, Массандровский водопад, Учан-Су и другие (рис. 1.3).

В части Причерноморского артезианского бассейна, относящейся к Равнинному и Предгорному Крыму, наибольшее значение для питьевого водоснабжения имеют водоносные комплексы в трещиноватых и закарстованных известняках палеогенового и неогенового возраста. Их краевой областью питания является Предгорный Крым, где восполнение ресурсов подземных вод происходит главным образом за счет поглощения руслового стока в местах пересечения реками предгорных гряд. Часть подземного стока восточных карстовых массивов Главной гряды (Долгоруковский, Карабийский), ввиду их плавного погружения на север под отложения более молодого возраста, также напрямую участвует в питании артезианского

бассейна. Таким образом, ресурсы основных эксплуатационных водоносных горизонтов равнинной и предгорной части полуострова формируются при ведущем участии карстовых водосборов Горного Крыма (рис. 1.3).

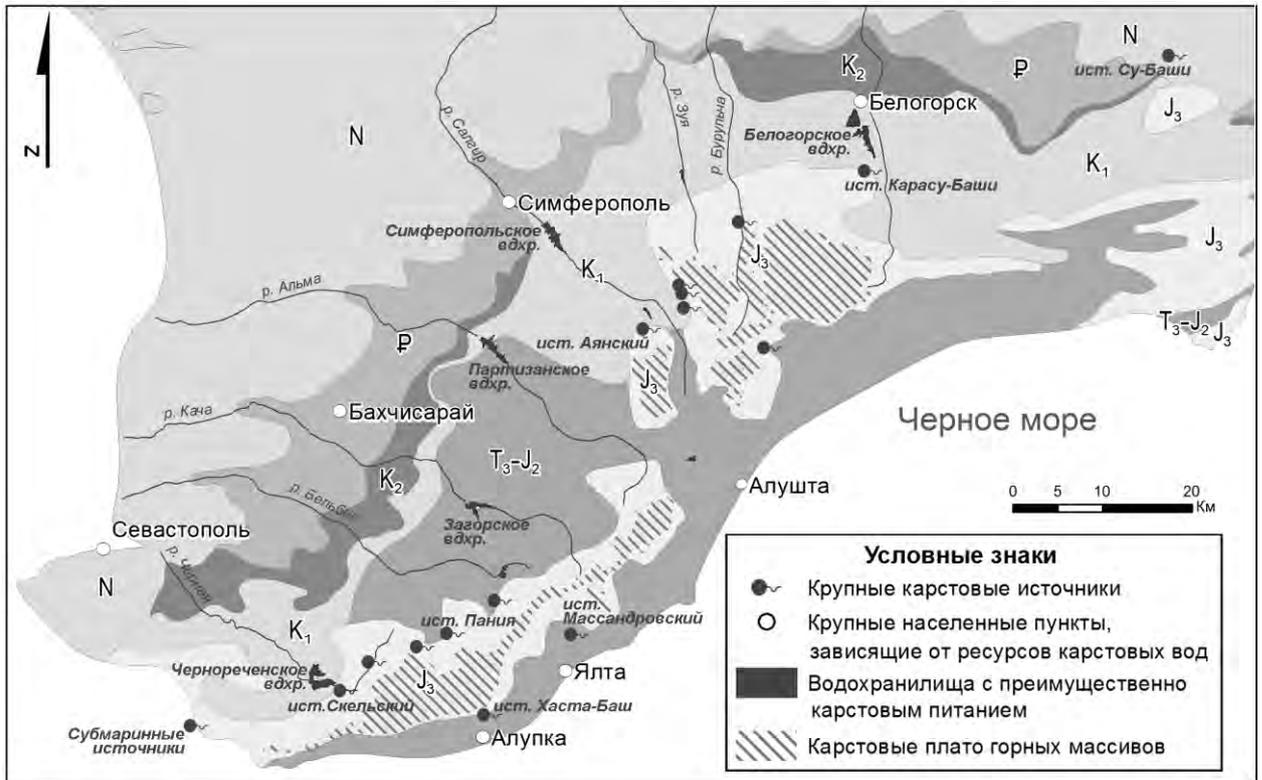


Рис. 1.3. Распространение проявлений карстовых вод и их использование на карте стратиграфических комплексов горных пород Горного Крыма. Границы стратиграфических комплексов выделены по карте В.В. Юдина (Геологическая карта, 2009).

Крымский полуостров относится к регионам с дефицитом естественных водных ресурсов. Кроме того, их распределение в пределах полуострова отличается высокой неравномерностью: водообеспеченность равнинной части на 1-2 порядка ниже, чем горной. Во второй половине XX века в связи с бурным социально-экономическим развитием региона возникла острая необходимость решения проблемы водоснабжения перспективных рекреационных и аграрных районов, страдающих от водodefицита. Для обеспечения развития туристско-рекреационного комплекса г. Ялты через Главную гряду был сооружен гидротоннель, через который осуществляется переброска воды с северного склона Крымских гор на южный. Проблема водоснабжения Равнинного Крыма была решена еще более кардинальным способом. Для развития аграрного комплекса и питьевых нужд растущего населения полуострова был реализован проект переброски воды из р. Днепр в Равнинный Крым посредством строительства Северо-Крымского канала (СКК). По итогам реализации проекта водообеспеченность

равнинной части полуострова стала в 4 раза больше горной. Ежегодный объем приходящей по СКК воды на начало 90-х гг. составлял около 3 км<sup>3</sup>, что примерно в 10 раз больше годового стока всех крымских рек (Дублянский, Дублянская, 1996).

С 2014 г. подача воды по СКК была прекращена и проблема водоснабжения региона встала как никогда остро. Частичное решение проблемы нашли в переброске части стока р. Биюк-Карасу, имеющей карстовое питание, по СКК на восток полуострова в наливные водохранилища (Фронтное, Феодосийское, Станционное), из которых снабжаются Феодосия и Керчь. Для этих целей также были сооружены новые крупные водозаборы ПВ в Равнинном Крыму, основанные на эксплуатации трещинно-карстовых вод мэотис-понтического водоносного комплекса: Нежинский (общая производительность 75 тыс. м<sup>3</sup>/сут.), Просторненский (75 тыс. м<sup>3</sup>/сут.), Новогригорьевский (45 тыс. м<sup>3</sup>/сут.).

В последние годы в Крыму отмечается стремительный рост объемов использования ПВ (рис. 1.4). В начале 90-х гг. забор ПВ в Крыму (без Севастополя) составлял около 250 млн. м<sup>3</sup>/год, поверхностных (с учетом СКК) – 3000-3500 млн. м<sup>3</sup>/год. К концу 90-х забор ПВ уменьшился до 150-200 млн. м<sup>3</sup>/год (Устойчивый Крым, 2003). Далее продолжалось постепенное уменьшение водозабора ПВ вплоть до 2013 г., когда он составил всего 68,5 млн. м<sup>3</sup>/год (Доклад, 2013). После прекращения подачи воды по СКК с 2014 г. из года в год отмечается резкое увеличение забора ПВ. В 2016 г. он составил 118,69 млн. м<sup>3</sup>/год, а забор поверхностных вод – 147,13 млн. м<sup>3</sup>/год. Таким образом, в настоящее время доля подземных источников в общем объеме отбора воды для питьевого водоснабжения населения Крыма практически достигает 50 %. При этом под подземными источниками в данном контексте имеются ввиду лишь искусственные водозаборные сооружения (скважины, колодцы), извлекающие воду непосредственно из водоносных горизонтов. С учетом обозначенной выше ведущей роли КПВ ГК в формировании естественного поверхностного стока полуострова можно уверенно заявлять, что карстовые подземные воды играют исключительную роль в водоснабжении населения Крымского региона и их значение в ближайшем будущем ожидаемо будет расти. Такая ситуация требует эффективных мер по охране качества КПВ от загрязнения.

### **1.3. Концепция уязвимости подземных вод и ее терминология**

Концепция уязвимости подземных вод к загрязнению основывается на том предположении, что физическая среда обеспечивает некоторую природную защищенность подземных вод от антропогенных воздействий, в частности от химических и биологических загрязнений, поступающих в подземную среду. Так, Н.В. Роговская (1976) отмечает, что в природе на пути миграции загрязнителей встречаются различные "препятствия", не пропускающие или затрудняющие проникновение загрязняющих веществ в водоносный

горизонт с поверхности земли (областей питания). В. М. Гольдберг (1983, 1987) определяет защищенность (уязвимость) подземных вод с геофильтрационных позиций как "перекрытость водоносного горизонта отложениями, прежде всего слабопроницаемыми, препятствующими проникновению в него загрязняющих веществ с поверхности земли". Таким образом, в связи с особенностями природных условий, в некоторых областях подземные воды подвержены воздействию загрязнений сильнее, а в других – слабее. Подверженность подземных вод загрязнению определяется временем дохождения загрязнителя от места его внедрения до уровня подземных вод (поверхности водоносного горизонта) при сохранении его концентрации (превышающей фоновое значение), химической (биологической, радиационной) и миграционной активности.

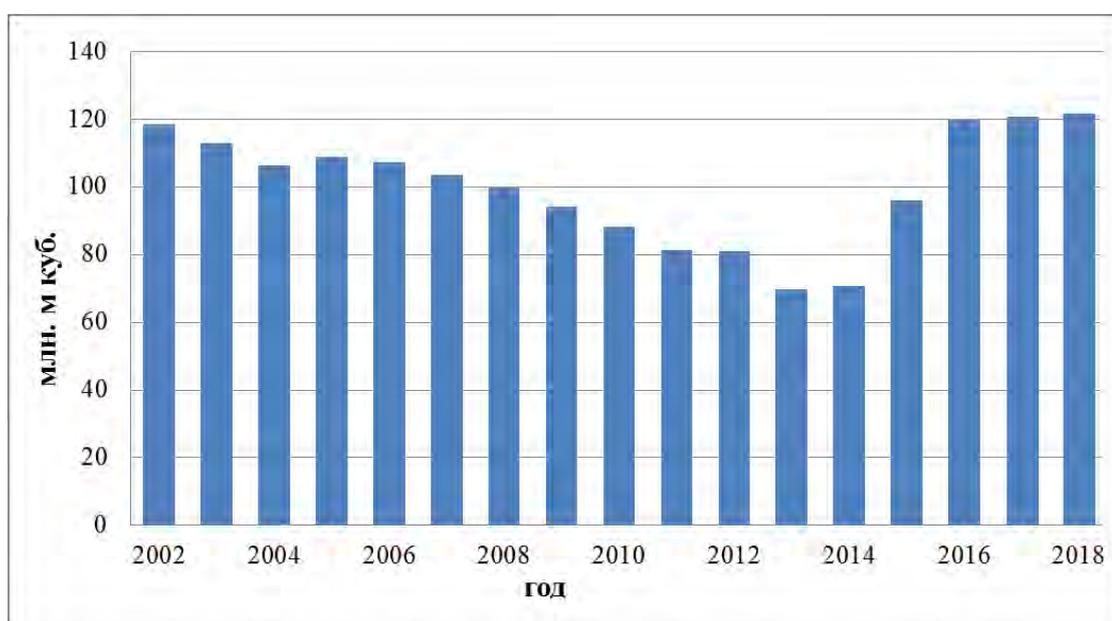


Рис. 1.4. Изменение годовых объемов забора вод из подземных источников в Республике Крым за 2002-2016 гг. (по данным Докладов о состоянии и охране окружающей среды Республики Крым за 2002-2018 гг.).

Понятие «уязвимость подземных вод к загрязнению» было введено французским гидрогеологом Ж. Марга в 1968 г (Margat, 1968) и в дальнейшем получила широкое развитие в международной гидрогеологии. В отечественной литературе по загрязнению подземных вод традиционно употреблялось альтернативное понятие "защищенность подземных вод", предложенное в 1976 г. Н. В. Роговской (Роговская, 1976; Гольдберг, 1983, 1987; Орадовская, Лапшин, 1987; Мироненко, Румынин, 1999; Шварц, 1996). Вместе с этим, в последнее время, многие отечественные гидрогеологи, наряду с «защищенностью», используют термин «уязвимость подземных вод» (Зекцер, 2001; Зекцер и др., 2004; Белоусова, 2001; Белоусова и

др., 2006; Рогачевская, 2002; Шестопалов и др., 2007). В этом не усматривается никакого противоречия, поскольку понятия «уязвимость» и «защищенность», хоть и являются обратными по значению, при этом тождественны по объему и содержанию. Иными словами, они представляют собой одну и ту же характеристику, но с противоположными знаками: высокой защищенности соответствует низкая уязвимость, и наоборот. Следовательно, набор факторов для оценки этих двух характеристик идентичен. В данной работе решено использовать термин «уязвимость подземных вод» (далее УПВ, или просто «уязвимость»), поскольку, в отличие от «защищенности», он получил признание и широкое распространение в международной литературе по охране подземных вод.

Понятие УПВ, изначально возникшее в рамках гидрогеологической науки, ввиду комплексности своей природы, в дальнейшем получило междисциплинарный характер применения. Это представляется закономерностью, поскольку при изучении данного предмета необходим учет не только геолого-гидрогеологических условий, но и комплекса других природных (ландшафтных) условий: климатических, орографических, гидрологических, почвенно-растительных. Все эти условия являются факторами УПВ.

Набор факторов УПВ, в зависимости от подхода, может значительно варьировать. Например, Н.В. Роговская (1976) выделяет только природные факторы уязвимости (мощность зоны аэрации, литологический состав пород, водно-физические, сорбционные свойства пород, гидродинамическую изолированность водоносного горизонта, локальные условия интенсивной фильтрации, растительный покров и пр.). В.М. Гольдберг (1987) же кроме природных факторов УПВ выделяет техногенные (условия нахождения загрязняющих веществ на поверхности земли и определяемый этими условиями характер проникновения загрязняющих веществ в подземные воды) и физико-химические (миграционная способность загрязняющих веществ, сорбируемость, химическая стойкость) факторы.

Оценка УПВ заключается в разделении исследуемой территории (области питания водоносного горизонта) на зоны, характеризующиеся различными геолого-гидрогеологическими и ландшафтно-геохимическими условиями (факторами уязвимости), определяющими различную степень уязвимости подземных вод к загрязнениям. Результатом такой оценки является построение соответствующей карты. При этом, масштаб картирования предопределяет требования к кондиции исходного материала, отражающего факторы УПВ. Согласно А.П. Белоусовой с соавторами (Белоусова и др., 2006), при картировании УПВ наиболее целесообразным считается построение среднемасштабных (1:100 000, 1:200 000) карт, поскольку такие карты носят качественный характер. В связи с этим, они могут быть использованы для приближенной оценки развития ситуации и принятия предварительных инженерных решений, а также являться основой для проектирования исследований более

крупного масштаба.

Как отмечает И.С. Зекцер (2001), оценка уязвимости подземных вод является, по существу, гидрогеологическим обоснованием мер по их защите в различных природных и антропогенных условиях. Определяющим показателем для принятия охранных мер является время достижения внедренным в данной точке области питания загрязнителем водозабора (каптажа источника, скважины или колодца). Поэтому, оценка уязвимости должна стремиться ответить на четыре основных вопроса в случае потенциального загрязнения, а именно:

- в каких источниках и водозаборах проявится загрязнитель (зависит от границ областей питания);
- каково время достижения загрязнителем водозабора;
- какова будет максимальная концентрация загрязнителя и когда она произойдет;
- как скоро концентрация загрязнителя снизится до фоновое значения.

Первая оценка УПВ была проведена на основе данных о литологии (метод гидрогеологического районирования) с построением для территории Франции карты масштаба 1:1 000 000 (Albinet, Margat, 1970). В дальнейшем оценкой и картированием УПВ также занимались Н.В. Роговская (1976), А.Д. Картер и др. (Carter et al, 1987), С. Фостер (Foster, 1987), Л. Аллер и др. (Aller et al., 1987), Н. Дюерфлигер и др. (Doerfliger et al, 1999), Л.М. Рогачевская (2002), Н. Гольдшайдер (Goldscheider, 2002, 2005), М. Чивита и М. Де Майо (Civita, De Maio, 2004), Ф. Цвален (Zwahlen, 2004), И.С. Зекцер и др. (2004), Н. Равбар (Ravbar, 2007) и др. Особого внимания по данному предмету заслуживает монография В.М. Шестопалова, А.С. Богуславского и В.Н. Бублясь (2007).

Существенный вклад в развитие методологии оценки УПВ сделали члены Международной Гидрогеологической Ассоциации. В своей работе под генеральной редакцией польских гидрогеологов Я. Врба и А. Запорожца (Vrba, Zaporozec, 1994) они провели обзор и анализ существующих определений УПВ и методов её оценки. Авторы подчеркивают, что УПВ является относительным, безразмерным свойством, которое невозможно измерить. Они предложили выделить не зависящую от источника загрязнения собственную уязвимость как внутреннее свойство системы подземных вод, которое характеризует чувствительность этой системы к антропогенным и/или природным воздействиям, в отличие от специфической уязвимости к тому или иному загрязнителю. Методы оценки УПВ были ими разделены на универсальные (используемые для любых природных условий) и местные (применимые для природных обстановок отдельных регионов). Кроме того, эти методы были объединены авторами: гидрогеологические, параметрические, методы численного и аналогового моделирования.

Под **уязвимостью системы подземных вод**, вслед за Я. Врбой и А. Запорожцем (Vrba,

Zaporożec, 1994) и В.Н. Шестопаловым и др. (2007), понимается ее чувствительность к загрязнениям, характеризуемая степенью развития комплексной барьерной функции верхней части геологической среды, определяемой развитостью физических (проницаемость, дисперсивность) и геохимических (сорбция) барьеров.

По итогам проведения Европейской программы COST (Cooperation in Science and Technology) Action 620 (1996–2002 гг.) по «картированию уязвимости и рисков по защите карбонатных (карстовых) водоносных горизонтов» были предложены следующие определения (Goldsheider, 2002; Zwahlen, 2004).

**Собственная (естественная) уязвимость** – это термин, используемый для определения уязвимости подземных вод. Он учитывает геологические, гидрологические и гидрогеологические свойства территории, но не зависит от свойств загрязнителей.

**Специфическая уязвимость** – термин, используемый для определения уязвимости подземных вод к конкретному загрязнителю или группе загрязнителей. Он учитывает свойство загрязнителя (загрязнителей) и его (их) взаимодействие с гидросистемой.

Согласно недавним трактовкам, специфическая уязвимость не зависит от способов землепользования, в отличие от определения, предложенного Я. Врба и А. Запорожцем (Vrba, Zaporożec, 1994). Программа COST 620 предлагает рассматривать аспекты землепользования и возможных источников загрязнений в отдельной «карте рисков».

Программа COST 620 указывает на то, что концепция картирования уязвимости для территориального управления должна основываться на **модели «происхождение-путь-выход» (или происхождение-путь-цель - с англ. origin–pathway–target):**

**Происхождение** – место потенциального загрязнения. COST 620 предлагает в качестве источника принимать земную поверхность. Это относится к таким видам деятельности, как, например, выпас скота и внесение пестицидов. Однако некоторые загрязнители сбрасываются ниже поверхности земли (например, посредством утечек из канализации).

**Выход (приемник)** – водные ресурсы, которые являются объектом охраны. Для охраны ресурса подземных вод (resource protection) приемником является их поверхность, для охраны источников (source protection) подземных вод выходом являются сами источники или колодцы.

**Путь** включает всю область транзита между источником и выходом. В аспекте охраны ресурса он состоит главным образом из вертикального движения вод через защитные слои, а в аспекте охраны источника он также состоит из горизонтального движения в водоносном горизонте к контурам разгрузки и водозабора.

Таким образом, уязвимость может оцениваться по защитным свойствам транзитной или покровной толщи пород на пути от поверхности земли до оцениваемого горизонта, куда инфильтрируется загрязненная поверхностная вода (сегмент 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 (сегменты 1 и 2; *уязвимость выхода*). Концептуальная иллюстрация этих двух подходов дана на рисунке 1.5.

В терминологии, предложенной В.М. Шестопаловым с соавторами (2007), эквивалентом уязвимости ресурса является *покровная уязвимость водоносного горизонта*, а эквивалентом уязвимости на выходе – *полная уязвимость подземных вод*. Там же приведены некоторые прочие определения, имеющие высокую важность для данной работы.

*Защитный потенциал* – суммарная гидравлическая и физико-химическая барьерная способность рассматриваемого слоя (почвы, зоны аэрации, насыщенной зоны), определяемая фильтрационным сопротивлением и емкостью слоя.

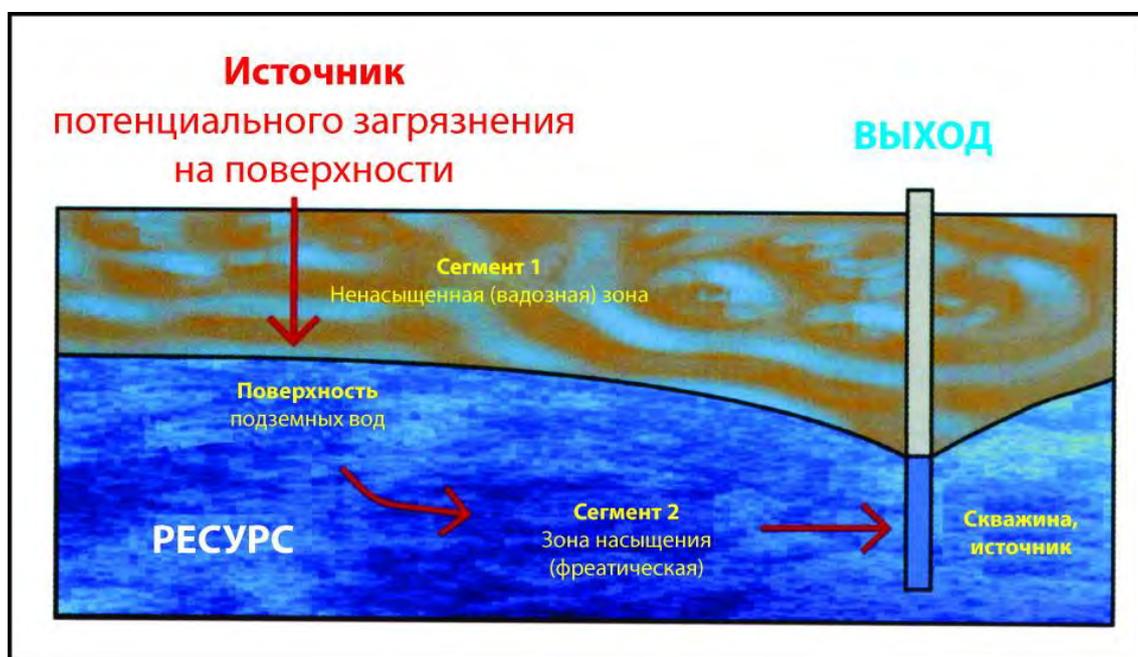


Рис. 1.5. Концептуальная иллюстрация понятий уязвимости ресурса и уязвимости на выходе подземных вод (Goldscheider, 2002, с переводом автора).

*Защитная емкость* – емкостная составляющая защитного потенциала слоя – способность слоя депонировать (иммобилизовать) растворенное загрязняющее вещество (в результате сорбции, химического преобразования, биологического поглощения и др.). Характеризуется отношением концентраций растворенного загрязнителя на входе в слой и выходе из него потока фильтрующихся подземных вод.

*Зоны быстрой фильтрации и миграции (ЗБФМ)* – площади (в плане), участки (в разрезе), или объемы (в пространстве) геологической среды разного характера, размера и происхождения, характеризующиеся наличием путей быстрой фильтрации подземных вод и миграции загрязнителей со скоростями, значительно превышающими фоновые значения в

ненарушенной геологической среде вблизи данных зон.

**Потенциал загрязнения** – удельный приток массы загрязнителя в единицу времени на единицу поверхности оцениваемых подземных вод. Является показателем уязвимости подземных вод рассматриваемого горизонта или водозабора.

#### **1.4. Методология и существующие методы оценки и картирования уязвимости подземных вод в условиях карста**

Концепция УПВ применима ко всем типам водоносных горизонтов – поровым (гранулярным), трещинным и карстовым. Однако, в связи с особенностями гидрогеологии карста, необходима разработка специального подхода, учитывающего характер карстовых водоносных горизонтов (КВГ). Ниже перечислены характеристики КВГ, которые значимы в аспекте УПВ, а, следовательно, должны учитываться при её оценивании (по Ford and Williams 1989, 2007; Drew and Hotzl, 1999; Klimchouk, Ford, 2000; Goldscheider, 2002, 2005; Климчук, 2009):

1. Каждая КВС имеет свои индивидуальные характеристики и любое их обобщение проблематично, если целью исследования является территориальная оценка. Детальное гидрогеологическое исследование карстовой системы является обязательным условием для применения любого метода по картированию уязвимости.

2. КВГ обладают высокой гетерогенностью и анизотропностью. Интерполяция и экстраполяция данных проблематична и достоверность карты уязвимости для карста ниже, чем для других территорий.

3. Карстовые подземные воды питаются как посредством рассеянной инфильтрации, так и посредством концентрированной точечной инфильтрации через воронки и поноры. Первый случай рассматривается как гораздо менее уязвимый, чем второй.

4. Перекрывающие слои выше карстового водоносного горизонта, такие как почва, четвертичные отложения, некарстующиеся подстилающие формации обеспечивают некоторую степень защищенности. Однако часто имеет место поверхностный и приповерхностный сток. Эти латеральные составляющие стока могут соединяться в потоки, поступающие в КВС через поноры.

5. Часто в КВГ имеет место эпикарстовая зона. Эпикарст, обладая высокими емкостными свойствами, способен накапливать и удерживать инфильтрационные воды в течение длительного времени, образуя подвешенный горизонт подземных вод. Тем самым он выполняет буферную защитную функцию по отношению к основному горизонту подземных вод – зоне полного насыщения (фреатической зоне). Тем самым эпикарст увеличивает природную защищенность гидросистемы. В то же время, концентрация стока в нижней части эпикарстовой

зоны рассматривается (Goldscheider, 2002, 2005) как фактор, увеличивающий уязвимость нижележащего водоносного горизонта. Структуру и гидрологическую функцию эпикарста сложно оценить, так как большая часть эпикарста не индицируется на земной поверхности.

6. КВГ характеризуются многоуровневой (двойной-тройной) пористостью (скважностью), соответствующей водовмещающим средам различной природы, структуры и размеров (пор, трещин, каналов). Накопление подземных вод происходит в порах и трещинах, в то время как каналы действуют в качестве дрен. Следовательно, в карстовых системах существуют как экстремально быстрые составляющие стока, так и медленные. Загрязнители могут быстро транспортироваться либо аккумулироваться на длительное время.

7. КВС характеризуются быстрой и сильной реакцией на гидрологические события. Временные вариации уровня подземных вод могут достигать несколько десятков метров, а иногда и более 100 м. Во многих карстовых системах уровень подземных вод дискретен и сложно определяем.

8. Карстовые водосборы часто имеют значительные размеры и гидравлически связаны на большие расстояния. Водоразделы часто сложно определяемы, варьируют во времени и зависят от соответствующих гидрологических условий. Водосборы карстовых источников часто перекрываются и пути движения вод, определяемые при трасерных тестах, часто пересекают друг друга.

Таким образом, очевидно, что для реализации адекватной оценки УПВ в условиях карста необходима разработка специального метода, отличного от методов оценки УПВ горизонтов порового или трещинного типов. При этом возможна реализация двух путей: 1 - разработка метода, который специально предназначен для карста; 2 - разработка метода, который применим для всех типов водоносных горизонтов, но имеет некоторые методологические средства для карстовых систем. Как замечает Н. Гольдшайдер (Goldscheider, 2002), второй способ считается более применимым по следующим причинам. Во-первых, существуют всевозможные переходные виды между чисто трещинными и высоко закарстованными карбонатными горизонтами. Во-вторых, существуют переходные виды между гранулярными и карстовыми горизонтами (например, карстующийся карбонатный гравий или интенсивно трещиноватые доломиты гидравлически подобны гранулярным горизонтам). В-третьих, на одной территории часто находятся несколько типов водоносных горизонтов, которые зачастую взаимосвязаны (например, гранулярный горизонт лежит выше карстового).

Первые шаги по созданию методологии оценки уязвимости карстовых подземных вод (далее УКПВ) были проделаны в ходе выполнения программы Европейской Комиссии COST Action 65 (1991-1995), в которой приняли участие специалисты 16 европейских стран. По итогам данной программы был опубликован отчет (COST Action 65, 1995), получивший

заголовок «Гидрогеологические аспекты охраны подземных вод в карстовых районах». Вскоре после этого швейцарскими специалистами был разработан метод ЕРІК, являющийся первым специализированным методом для оценки УПВ в условиях карста (Doerfliger et al, 1999).

В связи с возрастающим осознанием специфичности оценки уязвимости карстовых вод, играющих ведущую роль в водообеспечении ряда европейских стран, под патронатом Европейской Комиссии была проведена многолетняя международная (15 стран-участниц) программа COST Action 620 (Zwahlen, 2004). Тема программы была сформулирована как «Картирование уязвимости и рисков с целью охраны карстовых водоносных горизонтов». По итогам выполнения программы, на основе предыдущих наработок (Vrba, Zaporozec, 1994) была сформирована современная терминология УПВ. Также была разработана генеральная методологическая основа оценки УКПВ (Европейский подход), на базе которой в дальнейшем был разработан ряд методик оценки УПВ в условиях карста.

К настоящему времени разработана масса разнообразных подходов и методик оценки УВП, которые отличаются по набору учитываемых факторов, по цели и масштабу оценки. В отечественной гидрогеологической литературе принята следующая классификация методов оценки УПВ (Шестопалов и др., 2007):

- методы гидрогеологического районирования;
- индексно-рейтинговые методы;
- параметрические методы;
- методы математического моделирования.

*Методы гидрогеологического районирования* в историческом аспекте являются первыми методами оценки УПВ (Margat, 1968; Vrana, 1968, 1984; Albinet, Margat, 1970; Olmer, Rezac, 1974). Данные методы основаны на районировании исследуемой территории по гидрогеологическим условиям, а также рельефу, климатическим условиям, мощности, типу и составу почв и пород зоны аэрации. Обычно, гидрогеологическое районирование выступает в качестве подготовительного этапа при построении карты УПВ любым методом. Оценки УПВ методом районирования ограничиваются качественной категоризацией уязвимости для соответствующих выделенных зон. При этом чаще всего используется процедура наложения (оверлей) карт исходной информации.

Развитием методов гидрогеологического районирования послужила разработка *индексно-рейтинговых методов* оценки УПВ. Стимулом к их разработке, начиная с 1980-х гг, послужила необходимость эффективной и быстрой оценки риска загрязнения подземных вод в связи с возрастающими запросами муниципальных служб водоснабжения, фермерских хозяйств, экологических ведомств и т. п. в ряде стран (США, Франция, Италия, Германия). Эти методы созданы на основе простых алгоритмов суммирования факторных показателей защитной

способности геологической среды и гидрологических (гидрогеологических) условий территории. В дальнейшем, с внедрением современных ГИС технологий картирования, наиболее удачные из этих методов были развиты, унифицированы, и стандартизированы в ряде стран (Gogu, Dassargues, 2000a). Наиболее широко используемыми индексно-рейтинговыми методами являются системы DRASTIC (Aller et al, 1987), GOD (Foster, 1987), GLA (Hörling et al, 1995), ЕРІК (Doerfliger et al, 1999), PI (Goldscheider et al, 2000; Goldscheider, 2002, 2005) SINTACS (Civita, De Maio, 1997), COP (Vias et al., 2004, 2006), Словенский подход (Ravbar, Goldscheider, 2007, Ravbar, 2007), PaPRIKa (Dörfliger et al., 2009; Kavouri et al., 2011), DRISTPI (Jiménez-Madrid et al, 2013). Преимуществами данных методов является их универсальность (применимы для различных природных условий, но не все), разнообразие по набору оцениваемых факторов (можно подобрать тот, который соответствует имеющимся данным), гибкость (можно использовать неполный набор факторов, или дополнять его новыми характеристиками), возможность автоматизации процедуры оценки. Среди их недостатков можно отметить субъективизм в определении рейтинговых шкал оценки основных факторов УПВ (часто приходится прибегать к экспертной оценке), а также условность полученных результатов.

Параллельно с вышеуказанными группами методов развивались *параметрические методы*, производящие оценку УПВ на основе характерных физико-химических параметров, основными из которых являются время достижения подземных вод фронтом загрязнения, фактор задержки (отношение скоростей фильтрации воды и частиц загрязнителя), суммарное фильтрационное сопротивление покровных отложений (Шестопалов и др., 2007). Базовой методикой данной группы является оценочная система В.М. Гольдберга (1983, 1987), которая в качестве основного параметра УПВ принимает фильтрационное время достижения фронтом загрязнения уровня подземных вод. Используется для оценки уязвимости как грунтовых вод (первого от поверхности водоносного горизонта с открытой поверхностью), так и напорных водоносных горизонтов. В дальнейшем эту оценочную систему развивали В.А. Мироненко и В.Г. Румынин (1990), И.С. Пашковский (2002), Л.М. Рогачевская (2002), И.С. Зекцер с соавторами (2001, 2004), С.Р. Крайнов с соавторами (2004). Главным недостатком параметрических методов оценки УПВ является допущение об условно-сплошной среде, фильтрация в которой имеет плано-однородный характер. При этом подходе предполагается наличие в каждый момент времени на некоторой глубине четкого фронта продвижения мигранта с заданной концентрацией, глубже которого среда остается чистой. Очевидно, что при этом не учитываются емкостные и фильтрационные неоднородности геологической среды, которые имеют яркую выраженность в условиях карста и являются проводниками подавляющей доли подземного стока.

*Методы математического моделирования* при оценке УПВ опираются на математическое описание физических процессов, определяющих потенциальный перенос загрязнителей от их источников в подземные воды. Пространственная детальность доступной информации по фильтрационно-миграционным параметрам гидрогеологических систем почти всегда оказывается недостаточной для достоверного решения трехмерной фильтрационно-миграционной задачи, даже без учета ЗБФМ. Размерность модели можно упростить с трех до одного измерения и рассматривать одномерный вертикальный перенос с поверхности до оцениваемого горизонта. Такая модель была разработана В.М. Шестопаловым с соавторами (2007) и, в комплексе с методом гидрогеологического районирования, использована для оценки УПВ (с учетом ЗБФМ) украинской части бассейна р. Днепр (Киевская область). Преимуществом оценки также является гибкость оценки, заключающейся в меньшей привязке метода к конкретной территории и времени, большей надежности прогноза при изменении гидрогеологических условий территории, а также в принципиальной возможности учета неоднородностей геологической среды. Однако, построение универсальных математических моделей, адекватно описывающих миграцию загрязнителей в условиях карста, представляется невыполнимой задачей. Это связано с тем, что каждая карстовая система обладает уникальными чертами структуры и функционирования и, поэтому, их обобщение проблематично. Даже для отдельно взятых карстовых систем, в связи с высокой неоднородностью и анизотропией их емкостных и фильтрационных свойств, а также турбулентной составляющей движения подземных вод, оценка УПВ методом математического моделирования находит очень редкое применение. Примером подобного метода является система VULK (Jeannin et al, 2001), которая применима лишь для оценки УПВ в конкретной точке (в случае точечного загрязнения), но абсолютно не предназначена для площадного картирования уязвимости. Как отмечается (Zhang et al, 1996), даже в некарстовых условиях моделирование эффективно при необходимости получения результатов лишь на относительно мелких участках (крупный масштаб), в то время, как индексно-рейтинговые методы с применением ГИС являются допустимыми для больших территорий (средний масштаб).

В контексте данной работы целесообразно провести классификацию методов оценки УПВ на основании учета ими условий карста:

- применимые только для гранулярных водоносных горизонтов, т.е. условно сплошных сред (DRASTIC, GLA; все параметрические методы и большинство методов математического моделирования);
- разработанные исключительно для карстовых водоносных систем (ЕРІК);
- применимые для всех типов водоносных горизонтов, в том числе учитывающие особенности карстовых систем (PI, SINTACS, COP, Словенский подход).

Кроме этого, методы оценки УПВ разделяют на те, которые оценивают только уязвимость ресурса водоносного горизонта (многие параметрические методы, SINTACS, PI, COP и пр.), и те, которые оценивают уязвимость на выходе, т.е. полную уязвимость (EPIK, VULK, Ирландский, Словенский подходы и пр.).

Методы оценки УПВ различаются в зависимости от масштаба картирования (местный, локальный, региональный) и обусловленной им детальностью исходных данных (картируемых факторов), а также в зависимости от цели оценки (территориальное планирование, водоохранное зонирование, управление рисками).

Наиболее полный аналитический обзор методов оценки УПВ выполнен в работе венгерских авторов (Iván, Mádai-Szónyi, 2017). В ней сделан вывод о существующем тренде развития методологии УПВ в направлении количественных оценочных схем и числового моделирования с использованием физически обоснованных и процессных подходов. Однако такие подходы требуют исчерпывающей информации о процессах стока и транспорта внутри конкретных карстовых водоносных горизонтов, что является главным препятствием в связи с их высокой неоднородностью и сложностью.

Наиболее емкое по смыслу определение сущности и смысла оценки УПВ, с точки зрения автора, дано в работе С. Фостера и других (Foster et al., 2013). Авторы работы рассматривают оценку уязвимости как «наилучший профессиональный синтез» доступной информации, а ее результаты предлагают использовать в качестве инструмента показа для определения направления дальнейших исчерпывающих исследований.

Ниже дается краткая характеристика отдельных методов, разработанных для оценки УПВ с учетом гидрогеологических особенностей карстовых районов, получивших применение в нашей работе.

**Метод EPIK** (производное от Epikarst, Protective cover, Infiltration condition, Karst development), разработанный группой швейцарских исследователей (Doerfliger et al., 1999), является индексно-рейтинговым методом, специально предназначенным для оценки полной уязвимости карстовых водоносных систем. В нём учтены четыре фактора уязвимости: проявление эпикарста (E), эффективность защитного покрова (P), условия фильтрации (I) и развитие карстовой сети (K) (рис. 1.6).

Каждому фактору, в соответствии с его ранжированием, присваивается индекс, умножаемый на весовой коэффициент. В результате получаются некоторые величины, отражающие степень защиты, которую обеспечивает каждый фактор по отношению к подземным водам. Суммированием этих величин вычисляется индекс защиты (F). Конечные значения подразделены на четыре класса уязвимости и могут быть использованы для установления защитных зон (табл. 1.2).

Оценка фактора **Е** главным образом основано на анализе карстовой морфологии. Показатель фактора подразделяется на три категории, с уменьшающейся уязвимостью. Категория наиболее уязвимой области присвоена понорам, воронкам, карровым полям и разломным обнажениям, а также карьерам и обнажениям вдоль автомобильных или железных дорог. Средняя уязвимость характерна для промежуточных зон, и самая низкая уязвимость – для остальной части водосбора.

Метод ЕРІК требует сравнительно простую информацию о защитном покрове (фактор **Р**), включающую мощность почвы и грунта с качественной оценкой его гидравлической проницаемости.

Разработчики метода рекомендуют использовать его для картирования УПВ в крупном масштабе (1:10000 – 1:5000).

Оценка условий питания водоносного горизонта (фактор **Г**) основана на идентификации зон инфлюации и инфильтрации. Считается, что области с рассеянным питанием (инфильтрацией) менее уязвимы, чем области с концентрированным питанием (инфлюацией). Данные области различают по наличию гидрографической сети, крутизне склона и типу угодий (пашня, пастбища, луга).

Наличие или отсутствие карстовой сети и степень её развитие (фактор **К**) оценены с точки зрения нескольких прямых и косвенных показателей: спелеологических и геоморфологических характеристик, интерпретации трассерных тестов, анализе гидрографов и хемографов. Учет фактора **К**, характеризующего движение загрязнителей в насыщенной зоне, предполагает оценку полной уязвимости (уязвимости на выходе) подземных вод.

Метод ЕРІК протестирован во многих районах мира с разнообразным проявлением карста, в том числе в Бельгии (Gogu, Dassargues, 2000b) Германии (Швабские Альбы) (Goldscheider, 2002), южной Испании (Средиземноморский карст) (Vias et al, 2005), Словении (Динарский карст) (Ravbar, 2007), Иордании (Awawdeh, Nawafleh, 2008), Румынии (Robu, 2009). Кроме того, он внесён в Швейцарское законодательство по окружающей среде как стандарт для картографирования зон уязвимости.

Среди преимуществ данного метода можно отметить простоту оценочной процедуры, отсутствие потребности в точных количественных данных, оценку полной уязвимости (результаты оценки напрямую приводят к водоохранному зонированию).

Недостатками метода видится неучет важных гидрогеологических параметров: мощности зоны аэрации, объема питания, фактора трещиноватости пород; отсутствие оценки литологического фактора (предполагает наличие в разрезе только карстующихся пород); недостаточная обоснованность весовых коэффициентов; проблема оценки фактора эпикарста (эпикарст оценивается лишь по внешним признакам, причем не учитывается его буферная

функция).

Карстовая морфология присутствует	<b>E1</b>	Пещеры, поноры, воронки, карровые поля	
	<b>E2</b>	Промежуточные зоны между воронками, полями, увалами, сухими долинами	
Карстовая морфология отсутствует	<b>E3</b>	Остальная часть водосбора	
		Почва лежит непосредственно на породах, обладающих высокой водопроницаемостью	Почва лежит на породах с низкой водопроницаемостью, мощностью >20 см
	<b>P1</b>	Мощность почвы 0-20 см	
	<b>P2</b>	Мощность почвы 20-100 см	20-100 см почвы и пород с низкой водопроницаемостью
	<b>P3</b>	Мощность почвы >1 м	>1 м почвы и пород с низкой водопроницаемостью
	<b>P4</b>		>8 м пород с очень низкой водопроницаемостью или >6 м пород с очень низкой водопроницаемостью с >1 м почвы
Концентрированная инфильтрация	<b>I1</b>	Борта и русла временных водотоков; территории водосбора, имеющие искусственный дренаж	
	<b>I2</b>	Территории водосбора без искусственного дренажа с уклоном >10 % для пашни и >25 % для лугов и пастбищ	
Диффузная инфильтрация	<b>I3</b>	Территории водосбора без искусственного дренажа с уклоном <10 % для пашни и <25 % для лугов и пастбищ	
	<b>I4</b>	Остальная часть водосбора	
Хорошо развитая карстовая сеть	<b>K1</b>	Хорошо развитые карстовые системы с трещинами размером от 10 см до 1 м с высокой взаимосвязанностью	
Мало развитая карстовая сеть	<b>K2</b>	Слабо развитые карстовые системы с трещинами размером менее 10 см и низкой взаимосвязанностью	
Смешанные водоносные горизонты	<b>K3</b>	Территории с некарстующимися породами	

<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>I1</b>	<b>I2</b>	<b>I3</b>	<b>I4</b>	<b>K1</b>	<b>K2</b>	<b>K3</b>
<b>1</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>

$$F=3xE+P+3xI+2xK$$

Рис. 1.6. Схема оценки УПВ по методу ЕРІК (Doerfliger et al., 1999, с переводом автора).

Таблица 1.1. Ранжирование индекса защиты по методу ЕРІК

Уязвимость	Индекс защиты F	Зоны охраны S
Очень высокая	9-19	S1
Высокая	20-25	S2
Умеренная	более 25	S3
Низкая	более 25 с наличием P4+I3,4	Остальная часть водосбора

**Европейский подход** (Daly et al., 2002; Zwahlen, 2004) является общей методологической основой, специально разработанной для картографирования уязвимости и риска загрязнения карстовых водоносных систем. Был разработан в рамках выполнения под эгидой ЕС международной программы COST Action 620. Европейский подход не является исключительно карстоспецифическим подходом, т.е. может быть использован для оценки уязвимости других водоносных горизонтов. Значительное влияние на Европейский подход оказали методы ЕРІК и РІ.

Европейский подход оценки уязвимости ресурса подземных вод (рис. 1.7) основан на оценке трех основных показателей, которые обуславливают фильтрацию воды и загрязняющих веществ с поверхности к горизонту подземных вод. Среди них факторы перекрывающих слоев (показатель “О” от “Overlying layers”), концентрации стока (показатель “С” от “Concentration of flow”) и режима осадков (показатель “Р” от “Precipitation regime”). Показатель “О” должен учитывать защитные свойства перекрывающих слоев - почвы, подпочвы (эпикарста), некарстующихся и закарстованных пород зоны аэрации. Этот показатель характеризует степень естественной защищенности горизонта подземных вод (зоны насыщения). Тем не менее, в условиях карста возможен обход водно-миграционным потоком защитных слоев часто посредством его проникновения через поноры и попадания в карстовые каналы. Таким образом, происходит концентрация подземного стока, которую призван характеризовать показатель “С”.

На базе Европейского подхода были разработаны частные методы оценки УПВ, самые известные из которых методы COP и Словенский.

**Метод COP** был разработан в ходе выполнения программы COST Action 620 на основе метода РІ и Европейского подхода (Vias et al., 2004, 2006). Уязвимость оценивается как производная трех групп факторов, предложенных Европейским подходом (см. выше), от аббревиатуры которых и происходит название метода (рис. 1.8).

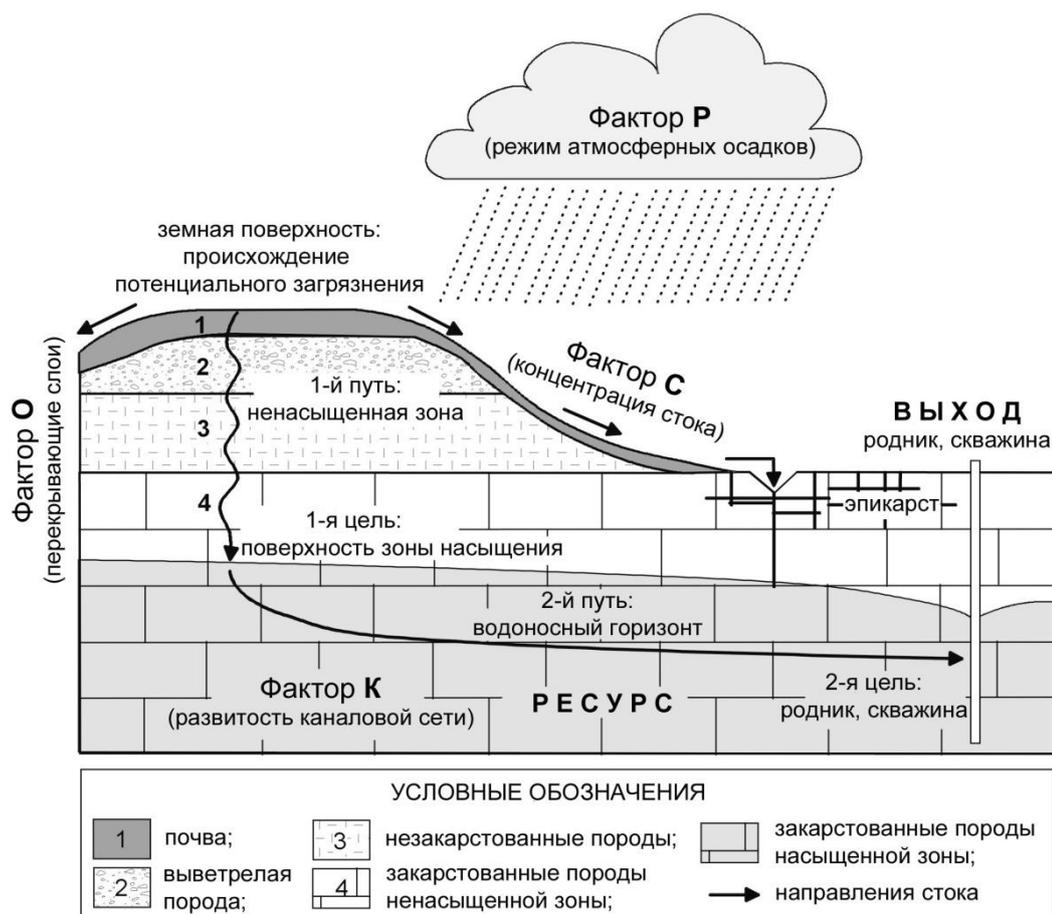


Рис. 1.7. Концептуальная схема основных факторов УКПВ согласно Европейскому подходу (по Goldscheider, Popescu, 2004, с переводом автора).

Показатель “О” принимает во внимание свойства защитных слоев, выше насыщенной зоны. В данном методе в качестве защитных слоев рассматриваются только почвенный покров и породы зоны аэрации. При оценке фактора почвы учитываются её мощность и механический состав. Породы зоны аэрации оцениваются с точки зрения их литологического состава (который определяет их основные гидрогеологические характеристики – эффективную пустотность и водопроницаемость), их мощность и степень трещиноватости. Также учитываются напорные условия водоносного горизонта.

Показатель “С” характеризует степень снижения эффективности защитного покрова за счет концентрации стока и обхода им перекрывающих слоев. Он учитывает топографические условия, которые могут способствовать как инфильтрационному питанию подземных вод, так и образовывать поверхностные водотоки и направлять их к зонам инфильтрации. Предлагается два различных алгоритма оценки: 1 – для водосборов потоков, проникающих через попор; 2 – для остальной части области питания. Для обоих сценариев учитывается крутизна склонов и плотность растительного покрова. При 1-м сценарии также принимается во внимание

расстояние от потора и поглощаемого им водотока. При 2-м сценарии учитывается развитость поверхностных карстопроявлений.

Показатель “Р” оценивается исходя из количества атмосферных осадков и их интенсивности. Чтобы оценить количество осадков, рассчитываются среднегодовые величины осадков исторической серии влажных лет. Влажные годы определены как такие, в которые количество выпавших осадков на 15% выше среднемноголетнего значения. Минимальные значение приписываются для областей с количеством осадков менее чем 400 мм/год. При увеличении объема осадков вплоть до 1200 мм/год защищенность подземных вод уменьшается (уязвимость увеличивается), поскольку авторы считают, что процессы переноса преобладают над процессами разбавления. Однако, когда осадки превышает 1200 мм/год, потенциальное загрязняющее вещество разбавляется и защищенность подземных вод сохраняется такой же, как и при 400 мм/год. Этот аспект представлен в методе SINTACS и немного иначе считается в методе PI (считается непосредственно объем питания подземных вод).

Конечный индекс COP получен умножением всех трех параметров и подразделен на пять различных классов уязвимости. О и Р параметры могут быть оценены для всех типов водоносных пластов, тогда как параметр С главным образом соответствует специфическим характеристикам карстовых водоносных систем.

Главным преимуществом метода COP видится его гибкость и простота, поскольку он не требует детальных исследований и большого массива количественных данных, а может обходиться вполне доступными и легко картируемыми данными. Апробация метода показывает его высокую эффективность и достоверность, главным образом в районах открытого и раскрытого карста средиземноморского типа (Vias et al., 2006; Marin et al., 2011). Однако, как показала работа Л. Плана с соавторами (Plan et al., 2009), в условиях альпийского типа карста использование метода COP приводит к переоценке реальной уязвимости, определяя более 80 % территории оцениваемого района как зону высокой и очень высокой уязвимости. Следует помнить, что метод в предложенном авторами виде применим лишь для оценки уязвимости ресурса подземных вод. Для оценки уязвимости на выходе необходимо вводить предложенный Европейским подходом фактор “К”. Так, Б. Андрео с соавторами (Andreo et al., 2009) предложили расширенную версию данного метода, учитывающего движение загрязнителя в насыщенной зоне: COP+K метод. Данная модификация метода была также апробирована в Словении на примере карстового водоносного горизонта Орехек (Marin et al, 2014).

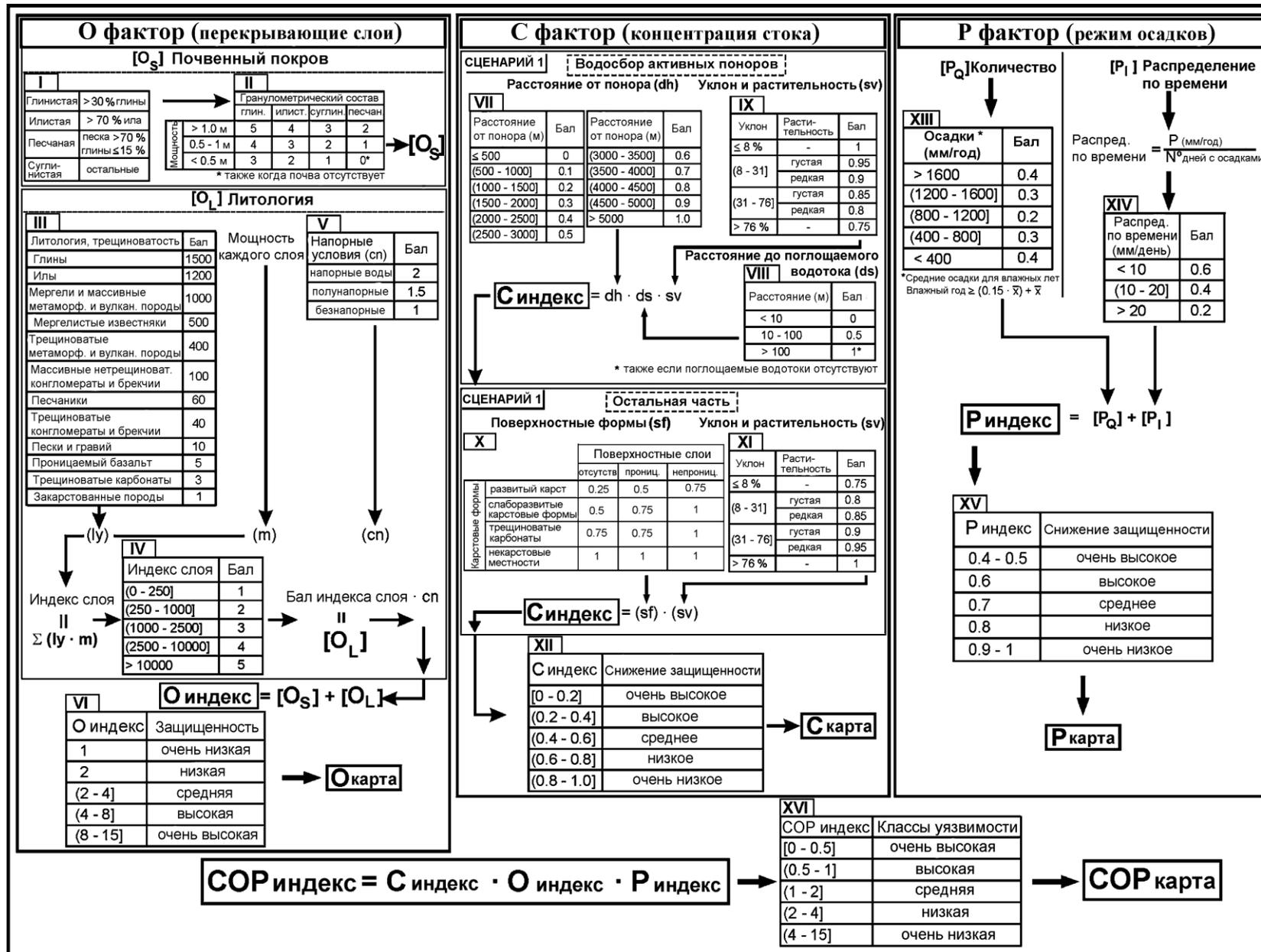


Рис. 1.8. Схема оценки УПВ по методу COP (по Vias et al., 2004, 2006, с переводом автора).

К сомнительным моментам метода можно отнести очень высокое влияние на результирующую уязвимость наличия активных поноров. Так, 500-метровая буферная зона вокруг них априори становится зоной очень высокой уязвимости. Получается, что даже в 500 м от поглотителей степень защищенности подземных вод будет равна нулю. Очевидно, отсюда проистекает упомянутое выше завышение уязвимости при её оценке. Среди упущений данного метода также стоит отметить игнорирование защитной функции эпикарста.

*Словенский подход* оценки и картирования собственной уязвимости, разработанный Н. Равбар совместно с Н. Гольдшайдером (Ravbar, Goldscheider, 2007; Ravbar, 2007), является усовершенствованной версией COP метода. Усовершенствование, прежде всего, заключается в том, что в схему оценки введен фактор развитости подземной карстовой сети (“К” фактор), позволяющий оценить уязвимость для конкретных водозаборов (т.е. уязвимость на выходе).

Алгоритм оценки фактора “О” остался практически без изменения. Произведено небольшое упрощение оценки защитных свойств почвенного покрова по гранулометрическому составу. В оценке литологии зоны аэрации несколько изменены индексы для закарстованных пород.

В оценочную схему показателя “С” введен фактор продолжительности активности поноров, поскольку инфлюация в них может происходить как большую часть года, так и в очень ограниченные периоды: связанные или с экстремальными осадками, или с обильным снеготаянием. Кроме того был снижен вес фактора близости активных поноров: нулевая защищенность присваивается буферу в 10 м вокруг понора, по сравнению с 500-метровым буфером по методу COP.

При оценивании фактора “Р” учитывается только внутригодовая интенсивность атмосферных осадков, без учета их среднемноголетнего количества. Принимается во внимание среднемноголетнее количество дней с осадками 20-80 мм/день и экстремальными осадками >80 мм/день.

Фактор “К” учитывает время прохождения загрязнителя от места сброса к выходу, развитость карстовой системы и вклад отдельных участков водосбора в формирование вод карстовых источников, скважин или колодцев.

Итоговый индекс уязвимости ресурса подземных вод вычисляется произведением индексов “О”, “С” и “Р”. Для определения индекса уязвимости на выходе полученное произведение умножается на индекс “К” с получением трех классов уязвимости: низкого, среднего и высокого.

Словенский подход использовался при оценке УПВ районов классического Динарского карста, результаты которой показали довольно высокую корреляцию с известными данными о гидрогеологии оцениваемых районов (Ravbar, 2007, Ravbar, Goldscheider, 2009). Сравнительно

недавно были опубликованы результаты использования данного подхода при картировании УПВ локальных карстовых районов в южной Испании (Средиземноморский карст) и Бельгии (Jiménez-Madrid et al, 2013).

### Выводы

При оценке уязвимости карстовых подземных вод к загрязнению наиболее существенное значение имеют их следующие особенности:

- 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 – высокая вероятность прямого попадания загрязнителя в карстовые водоносные системы и его концентрированного выхода в карстовых источниках;

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

- низкая сорбционная способность карстующихся пород наряду с высокой скоростью движения карстовых вод и их подземной концентрацией – 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 – высокая дискретность условий питания карстовых подземных вод.

Согласно разработанной в последние десятилетия общей международной методологии, оценка уязвимости карстовых подземных вод производится по 4-м группам факторов: факторы перекрывающих слоев (оцениваются через интегральный показатель “О”), концентрации стока (показатель “С”), режима атмосферных осадков (показатель “Р”) и развитости карстовой сети (показатель “К”). 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 подземных вод.

## ГЛАВА 2

# ВЫЯВЛЕНИЕ И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ГОРНО-КРЫМСКОЙ КАРСТОВОЙ ОБЛАСТИ

### 2.1. Краткая характеристика природных (фоновых) условий

#### *Границы и районирование*

Поскольку основным объектом исследования данной работы являются подземные воды карстового типа, за основу для выделения границ района исследования принимаем схему карстологического районирования. Согласно новейшей схеме карстологического районирования Б.А. Вахрушева (2009), Крымские горы относятся к карстовой провинции Горного Крыма, в пределах которой выделяют Предгорно-Крымскую и Горно-Крымскую области. Обособление этих областей видится целесообразным ввиду резкого различия условий развития карста в них. Схему Б.А. Вахрушева принимаем за основную, относя район исследования данной работы к Горно-Крымской карстовой области (рис. 2.1).

Границы таксономических единиц карстологического районирования во многом совпадают с общими физико-географическими границами. Согласно физико-географическому районированию Крымского полуострова П.Д. Подгородецкого (1988), район исследования относится к области Главной горно-лугово-лесной гряды. В орографическом отношении принимаемые границы района исследования соответствуют Главной гряде Крымских гор, включая ее северный и южный склоны.

Для настоящего исследования в качестве ключевого района в Горном Крыму был выбран карстовый массив Ай-Петри, соответствующий одноименному карстовому району (рис. 2.2). Площадь массива по принятым границам составляет 237 км<sup>2</sup>. Ай-Петринский карстовый район протягивается с юго-запада на северо-восток от перевала Байдарские ворота до г. Рока (1346 м), с севера на юг – от г. Бойко (1087 м) до г. Ай-Петри (1234 м). Диапазон абсолютных высотных отметок района составляет 270-1370 м. С запада район граничит с Байдарско-Балаклавским карстовым районом, с востока – с Ялтинским. В нем выделяют 3 подрайона: Западно-, Центральнo- и Восточно-Айпетринский. Границы карстовых районов и подрайонов проведены в соответствии с принятыми критериями для карстологического районирования (Дублянский, Кикнадзе, 1984; Дублянский, 1986) и в основном соответствуют ранее выделенным территориальным карстовым единицам (Иванов, 1961, Дублянский, Дублянская, 1992, Вахрушев, 2004, 2009).

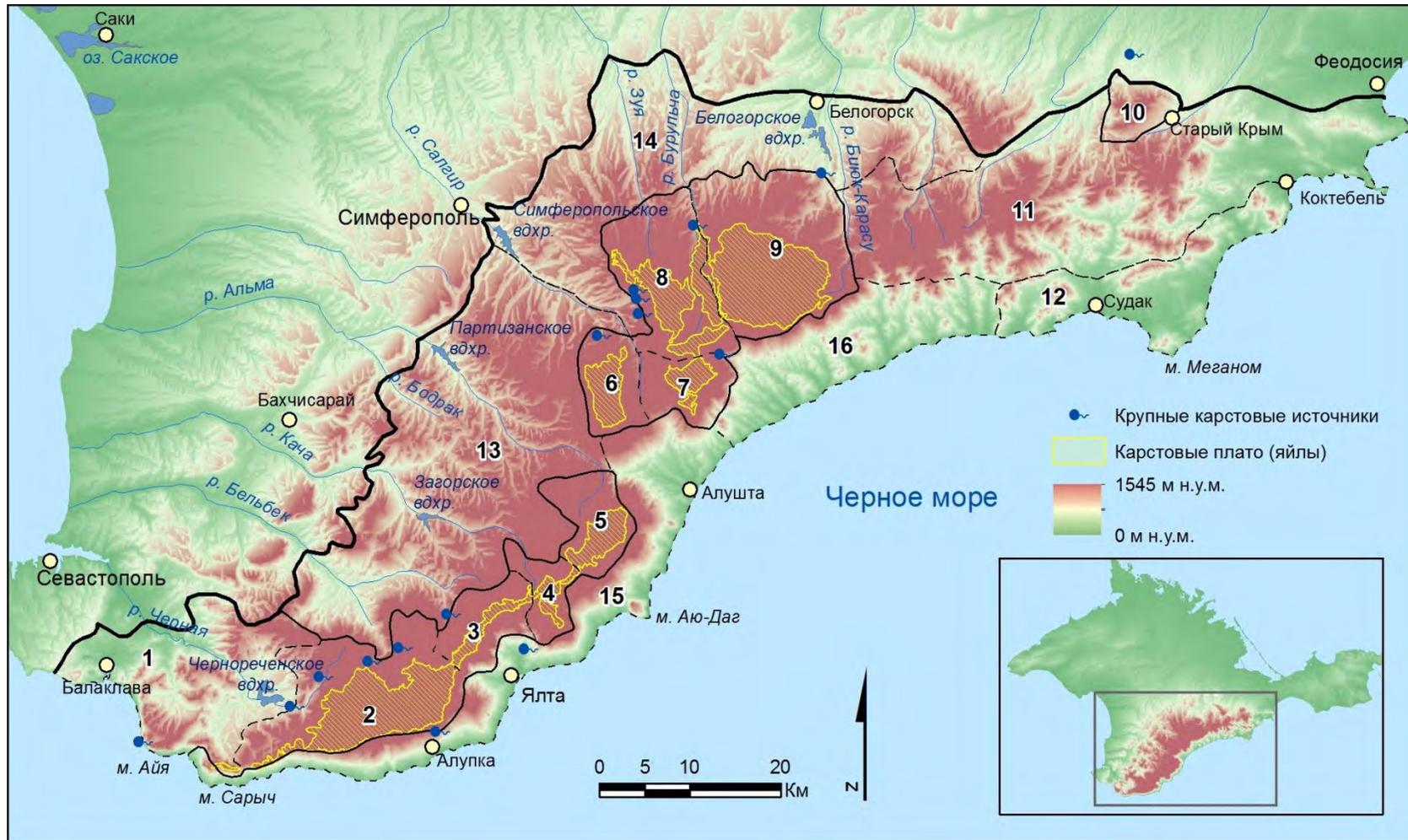


Рис. 2.1. Карстологическое районирование Горно-Крымской карстовой области (составлен автором по Б.А. Вахрушеву (2009)).

Границы Горно-Крымской карстовой области (черная жирная линия) и карстовых районов (пунктирная линия). Районы сплошного развития карста (выделены сплошной линией): 1 – Байдарско-Балаклавский, 2 – Ай-Петринский, 3 – Ялтинский, 4 – Никитский; 5 – Бабуганский, 6 – Чатырдагский, 7 – Демерджинский, 8 – Долгоруковский, 9 – Карабийский, 10 – Агармышский; районы с фрагментарным развитием карста: 11 – Восточно-Крымский, 12 – Судакский; районы с незначительным развитием карста либо его отсутствием: 13 – Качинско-Курцовский, 14 – Салгирско-Индольский, 15 – Западно-Южнобережный, 16 – Восточно-Южнобережный.

Характерной особенностью центральной и восточной части Ай-Петри является наличие выположенных платообразных вершинных поверхностей - яйл. Общая орографическая схема яйл включает следующие элементы (Иванов и др., 1960):

- крупные возвышенности, местные холмистые водораздельные гряды;
- крупные долинообразные и котловинные понижения и котловины;
- значительные по площади относительно равнинные платообразные участки с холмистыми, грядовыми возвышенностями и котловинными или ложбинными понижениями;
- верховые водосборные понижения, открывающиеся на склоны яйлы.

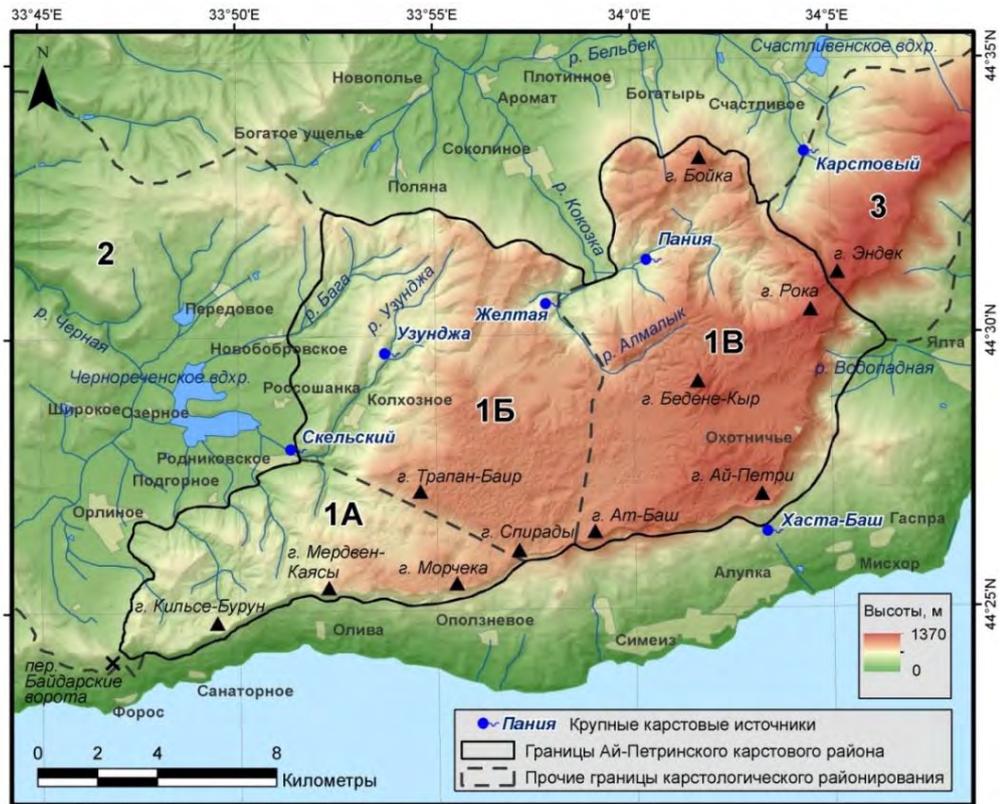


Рис. 2.2. Границы Ай-Петринского карстового района (составлен согласно схеме карстологического районирования Б.А. Вахрушева (2009) с выделением подрайонов по Б.Н. Иванову (1961)).

Карстовые подрайоны: 1А – Западно-Ай-Петринский, 1Б – Центрально-Ай-Петринский, 1В – Восточно-Ай-Петринский. Соседние карстовые районы: 2 – Байдарско-Балаклавский, 3 – Ялтинский.

### *Геологическое строение*

В геологическом строении Горного Крыма принято выделять два структурных этажа, сложенных породами разного возраста и литологии. Нижний структурный этаж сложен породами таврической серии верхнетриасового и нижнеюрского возраста, а также породами

средней юры. Таврическую серию слагает мощный комплекс терригенных флишевых и флишеидных отложений, состоящих из ритмично чередующихся аргиллитов, кварцевых плотных алевролитов и песчаников. Флишевые отложения интенсивно смяты в складки. Таврическая серия включает локально развитые вулканогенные образования, горизонты известняковых глыб (массандровская свита), пачки гравелитов и конгломератов. Мощность пород таврической серии в Горном Крыму, достоверно нигде не установленная, оценивается в несколько километров (Геология СССР, 1969). На размытой поверхности дислоцированных пород таврической серии с резким несогласием залегают песчано-глинистые отложения средней юры. В литологическом отношении эти отложения схожи с породами таврической серии, в то же время характеризуются гораздо меньшей дислоцированностью, чем последние. Согласно оценкам, мощность среднеюрских отложений в Горном Крыму достигает 1500-2000 м (Муратов, 1960). В нижних горизонтах среднеюрской толщи на отдельных изолированных участках встречаются магматические породы в виде интрузивных и эффузивных тел.

В гидрогеологическом отношении нижний структурный этаж представляет собой водоупорный цоколь, подстилающий водоносные породы верхнего структурного этажа. Последний слагается породами верхнеюрского возраста и терригенными отложениями раннего мела. Верхнеюрский комплекс представлен всеми ярусами, но из них наиболее распространены породы, относящиеся к оксфорду, кимериджу и титону. Отличительными особенностями верхнеюрского комплекса является исключительное литологическое разнообразие состава слагающих его отложений, резкая фациальная изменчивость, контрастность мощностей, невыдержанный характер взаимоотношений с подстилающими и перекрывающими породами и наличие внутренних перерывов и несогласий. Кроме того, строение данного комплекса осложнено многочисленными разрывными нарушениями (сбросами, взбросами, надвигами, сдвигами). Общая мощность верхнеюрских отложений в Горном Крыму сильно колеблется: от первых десятков метров до нескольких километров (район Ялты, массивов Демерджи и Караби) (Геология СССР, 1969).

Литологически верхнеюрские отложения Горного Крыма представлены сложно взаимосвязанными друг с другом разнообразнейшими типами карбонатных, глинистых и терригенно-обломочных образований от чистых пелитоморфных известняков и тонкоотмученных глин до полимиктовых песчаников и грубообломочных конгломератов и брекчий, а также различных смешанных по составу осадочных пород (глинистые известняки, известковистые песчаники, песчанистые глины и т.д.). Основные карстовые массивы Горного Крыма (Ай-Петри, Бабуган, Чатырдаг, Караби) сложены главным образом карбонатными породами: массивными (рифовыми) и слоистыми известняками, тонкослоистыми глинистыми и мергелистыми известняками, песчанистыми известняками, мергелями (Геология СССР, 1969).

На восточных массивах Главной гряды (Доргуроковский, Караби, Агармыш) водоносная толща верхней юры на северных склонах погружается под нижнемеловые отложения. На остальных массивах Главной гряды она имеет цокольное положение.

Отложения нижнего мела в пределах Горного Крыма представлены породами берриасского, валанжинского, готеривского и барремского ярусов (Геологическая карта..., 1984). Нижнемеловые отложения в пределах Главной гряды представлены в основном глинистыми фациями. В отдельных участках Горного Крыма нижнемеловые отложения нередко залегают в глубоких депрессиях, перекрывая титонские отложения (Байдарская, Варнаутская, Молбайская котловины). На северном склоне Главной гряды наблюдается выклинивание валанжина, а более высокие слои нижнего мела уходят под толщу трансгрессивно покрывающего их верхнего мела и палеогена.

Водоносная карбонатная толща Ай-Петринского массива также характеризуется довольно высокой литологической неоднородностью. По данным геологической съемки и бурения глубоких скважин (Чуринов 1961, 1980) выяснено, что в его строении принимают участие 5 типов пород: известняки, мергели, глины, песчаники и конгломераты. Слагающие массив породы включают 20 разновидностей от чистых известняков с содержанием  $\text{CaCO}_3$  до 95 % до глин, содержащих 95 % глинистого вещества и 5%  $\text{CaCO}_3$ . Так, Б.Н. Иванов (1961) в пределах только северо-восточной части Ай-Петринского массива выделяет следующие разности известняков: массивные, слоистые, неяснослоистые, неясноплитовые, неяснотонкослоистые, мергелистые известняки, а также мергелисто-известняковые и известняково-мергелистые толщи. Такая пестрота фациального состава карбонатных пород обуславливает различную степень закарстованности и, как следствие, высокую изменчивость водно-коллекторских свойств пород. В числе других факторов эта особенность активно воздействует на формирование гидрогеологических условий массива.

Касательно тектонического строения Горного Крыма, несмотря на 200-летнюю историю его изучения, до сих пор существует ряд нерешенных проблем. Так, до сих пор не удается создать единую тектоническую модель, приемлемую для всех исследователей. Существуют две альтернативные точки зрения на тектоническое строение региона: фиксистская и мобилистская.

С середины прошлого столетия для объяснения геологического строения Горного Крыма использовалась преимущественно фиксистская (геосинклинальная) тектоническая модель (Муратов, 1960; Пчелинцев, 1962; Геология СССР, 1969). Согласно последней считается, что Горный Крым в тектоническом отношении соответствует крупному мегантиклинорию, южное крыло и часть ядра которого по сбросам опущено ниже уровня Черного моря. В пределах сохранившейся части ядра мегантиклинория располагается ряд крупных глыбово-складчатых структур – антиклинориев и синклинориев. Породы таврической серии и средней юры слагают

антиклинории – Южнобережный, Качинский, Туакский. Породы верхнего структурного этажа участвуют в строении синклинориев – Юго-Западного, Восточно-Крымского и Судакского. Различия в литологии и физико-механическом составе горных пород предопределили инверсию рельефа. Синклинории, сложенные верхнеюрскими известняками, представлены в рельефе наиболее возвышенной частью Крымских гор – массивами Главной гряды, а антиклинории – сниженными участками южного берега и северного макросклона Главной гряды. Геодинамика подобной тектонической модели развития рельефа Крымских гор обеспечивается системой активных продольных (субширотных) и поперечных (субмеридиональных) региональных разрывов земной коры. Данные представления отражены во всех государственных геологических картах, а также картах С.В. Пивоварова (Геологическая карта, 1984) и А.А. Пасынкова (2003а, 2003б).

Иные представления о тектоническом строении Горного Крыма у сторонников мобилистской концепции, наиболее известными из которых являются Ю.В. Казанцев и В.В. Юдин. В работах Ю.В. Казанцева и его соавторов предлагается шарьяжная модель строения с многочисленными крупно-амплитудными тектоническими покровами (Казанцев, 1982). Несколько иную модель тектонического строения Горного Крыма – модель актуалистической геодинамики, или мобилистскую модель – предлагает В.В. Юдин (Юдин, 2011). Согласно ей, латеральное сжатие более чем на 50 км привело к тектоническому скучиванию и формированию в пределах современных Крымских гор и континентального склона Черного моря хаотических комплексов пород: эндогенно-тектонических микситов – меланжей и экзогенно-тектонических (оползневых) олистостром. В начале позднего мела с предрифтового поднятия, располагавшегося в осевой части современного Черного моря, были смещены и надвинуты гигантские пластины верхнеюрских известняков (Горно-Крымская олистострома), ныне слагающие в пределах Главной гряды массивы Крымских яйл. В то же время, блоковые вертикальные движения не отрицаются, а рассматриваются как малоамплитудные и разнонаправленные сколы торшения в тектонических пластинах и олистоплаках. Мобилистская концепция тектонического строения Горного Крыма отражена в геологической карте В.В. Юдина (Геологическая карта, 2009). На рисунке 2.3 показаны примеры геологических разрезов через массив Ай-Петри, построенных с позиций фиксизма и мобилизма.

Анализ рассмотренных концепций показывает, что наибольшие отличия касаются истории развития геологических структур региона. В меньшей степени эти отличия касаются литологии, тектонических нарушений и влияния скорости неотектонических движений на рельеф, а, следовательно, и закономерностей формирования подземных вод карстовых массивов. Поэтому в контексте данной работе выбор одной определенной (из двух альтернативных) тектонической модели не имеет принципиального значения. В качестве рабочей тектонической

схемы Горно-Крымского региона принята карта тектонических структур А.А. Пасынкова (2003б), уточненная по картам тектоники из комплекта Государственной геологической карты (2005). Данная схема, представленная на рисунке 2.4, в своей основе имеет геосинклинальную модель, но в то же время содержит элементы мобилистской модели (Горно-Крымское сооружение определено как складчато-надвиговое, выделена шовная зона сочленения Скифской плиты и сооружения Горного Крыма). В качестве местной схемы (для масштаба отдельных массивов) принята складчато-блоковая тектоническая модель, успешно использовавшаяся во всех предыдущих карстолого-гидрогеологических работах, проводимых в Горном Крыму (Труды совещания, 1969; Комплексные изыскания, 1971; Шутов, 1971; Приблуда и др., 1979; Дублянский, Кикнадзе, 1984; Шестопапов и др., 2008).

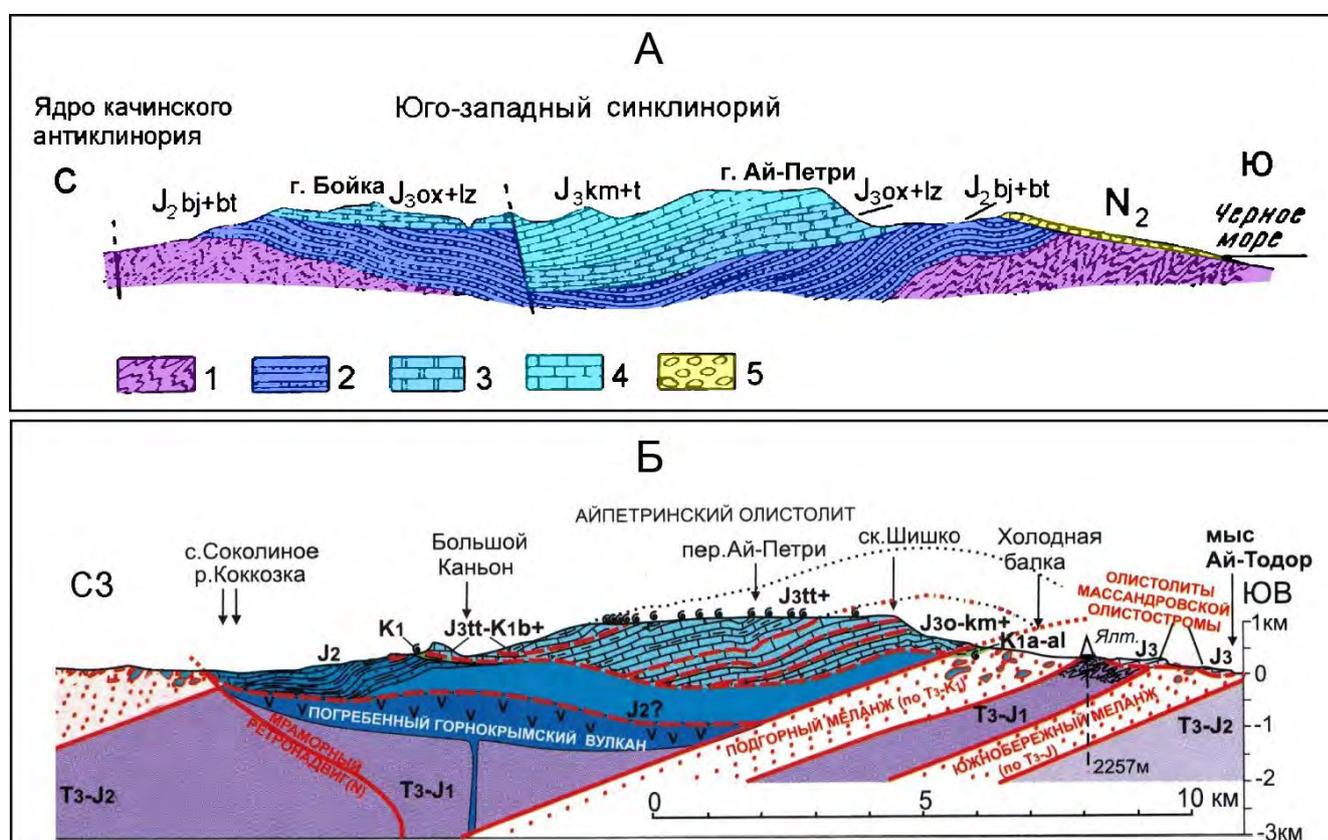


Рис. 2.3. Геологический разрез через массив Ай-Петри Горного Крыма согласно: А – геосинклинальной (фиксистской) модели М.В. Муратова (Геология СССР, 1969) и Б – модели актуалистической геодинамики (мобилистской) В.В. Юдина (Геологическая карта, 2009).

Условные обозначения к блоку А: 1 – таврическая серия, 2 – средняя юра (байос-бат), 3 – оксфорд (известняки), 4 – кимеридж-титон (известняки), 5 – массандровские отложения (плиоцен).

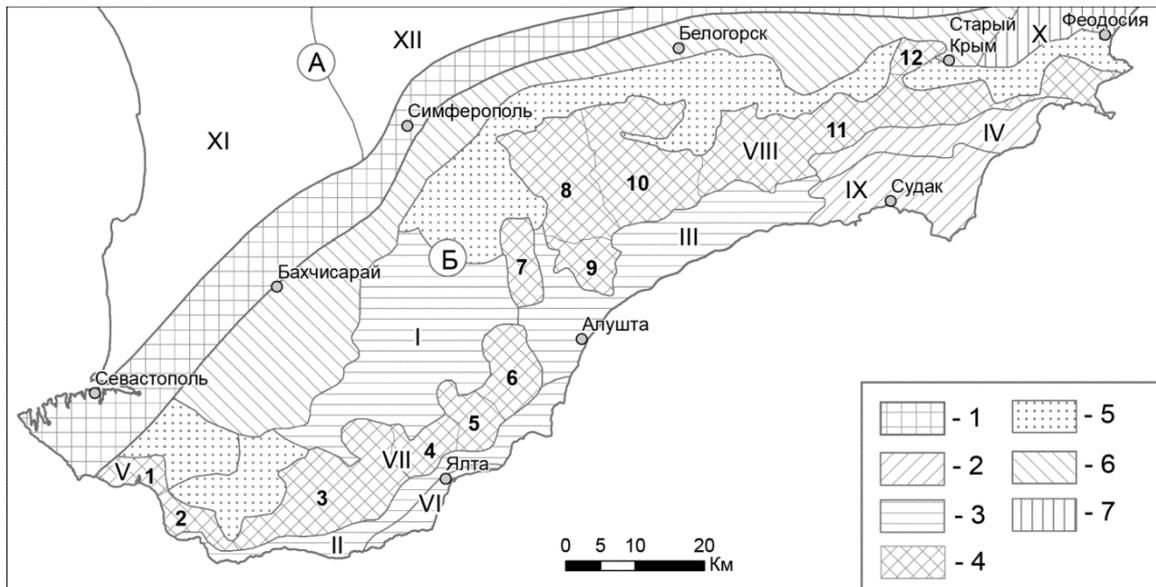


Рис. 2.4. Тектоническая схема Горного Крыма (составлена по А.А. Пасынкову (2003б), с уточнением границ структур и добавлением шовной зоны по Государственной геологической карте, 2005).

Тектонические структуры: региональные (А - Скифская плита, Б - Горно-Крымское складчато-надвиговое сооружение), субрегиональные (I - Качинское поднятие, II - Южнобережное поднятие, III - Туакское поднятие, IV - Судакско-Карадагская складчатая система, V - антиклиналь Сухой речки, VI - Ялтинская антиклиналь, VII - моноклираль юго-западной части Горного-Крыма, VIII - моноклираль восточной части Горного Крыма, IX - Судакская складчато-надвиговая зона, X - восточное периклиральное окончание Горно-Крымского складчато-надвигового сооружения, XI - Альминская впадина, XII - Симферопольское поднятие). Расшифровка легенды: 1 – шовная зона сочленения Скифской плиты и Горно-Крымского сооружения; 2 – складчато-надвиговые структуры в триас-юрских породах; 3 – поднятия, сложенные породами таврической серии и средней юры; 4 – моноклинали в породах верхней юры; 5 – грабен-синклинали и моноклинали в породах юры и нижнего мела; 6 – моноклинали в породах мел-палеогена-неогена; 7 – складчатые структуры в породах майкопской серии палеогена.

Структурные элементы в карбонатных породах верхней юры - нижнего мела (блоки): 1 - Балаклавский, 2 - Варнаутско-Байдарский, 3 - Ай-Петринский, 4 - Ялтинский, 5 - Никитско-Гурзуфский, 6 - Бабуганский, 7 - Чатырдагский, 8 - Долгоруковский, 9 - Демерджинский, 10 - Карабийский, 11 - Синекаменский, 12 - Агармышский.

Согласно принятой тектонической схеме, основными геологическими структурами, содержащими карстовые воды, являются блок-моноклинали в породах верхней юры. В рельефе они выражены столовыми массивами, сложенными различными разностями известняков,

образующих толщи мощностью до 1000 м и более. Гидрогеологические условия осложнены межгорными котловинами, в пределах которых наблюдается глубокое погружение закарстованных водоносных пород с перекрытием их водоупорными глинистыми отложениями. Блок-моноклинали осложнены многочисленными разрывными нарушениями. Они во многом определяют гидрогеологическую структуру карстовых массивов. Последний факт был обнаружен, кроме прочего, при изысканиях в ходе строительства Ялтинского гидротоннеля, проходящего сквозь Главную гряду (Комплексные изыскания, 1971).

*Климатические условия.*

Питание карстовых подземных вод Горного Крыма происходит главным образом за счет атмосферных осадков. Количество и режим последних определяется погодно-климатическими условиями региона. Следовательно, для уяснения условий питания подземных вод необходимо дать характеристику климатических условий региона. Необходимо уяснить характер атмосферной циркуляции, температурного и ветрового режимов, и, как итог, режима атмосферных осадков в районе исследования.

В целом, целесообразно рассматривать климатические условия отдельно для западной части региона, которую представляет метеостанция Ай-Петри (абсолютная отметка 1180 м н.у.м.), и восточной, где имеется метеостанция (ныне – метеопост) Караби (абсолютная отметка 987 м н.у.м.). Это старейшие метеостанции Крыма, которые имеют наиболее продолжительные, а, следовательно, и более точные ряды наблюдения. Климатические условия центральной части Горного Крыма можно характеризовать на основе данных метеостанции Ангарский перевал, продолжающей работать в настоящее время.

Преобладающим в Горном Крыму является континентальный воздух умеренных широт. Повторяемость этих воздушных масс составляет 60-65% всех дней в году (Ведь, 2007). Тропические воздушные массы имеют более низкую повторяемость, но с ними поступает значительное количество тепла. В течение большей части года Горный Крым находится под влиянием отрогов высокого давления (Азорского и Азиатского). Зимой довольно часто происходят вторжения арктического воздуха.

По данным метеостанций среднегодовая температура яйлинских районов составляет от 5,7 °С (Ай-Петри) до 6,3 °С (Караби-яйла), в то время как на южном макросклоне она достигает 12,4 °С (Никитский сад, Алушта). На северном макросклоне ее значение составляет около 10 °С (Белогорск 9,9 °С, Орлиное и Голубинка – 10,2 °С). Контрастность температурного режима отдельных районов Горного Крыма также демонстрируют различия средней температуры января. Так, средняя температура января на яйлах составляет -2...-4 °С, а в нижней части южного макросклона (западное южное побережье) достигает 3...4 °С. Район Горного Крыма в большей своей части характеризуется вертикальной поясностью климата. Исключением является южный

макросклон Главной гряды, климат которого подвергается сильному влиянию со стороны Черного моря. Понижение температуры с высотой в горах составляет в среднем за год 0,62 °С на 100 м, причем летом высотный градиент температуры достигает 0,72 °С на 100 м, а осенью снижается до 0,55 °С на 100 м. Существенное влияние на температуру воздуха оказывает рельеф. В частности минимальная температура воздуха в зависимости от местных условий может изменяться в пределах 4-5°, а на яйлах даже в пределах 10-12 °С (Ведь, 2007). Наиболее теплыми являются вершины возвышенностей и верхние части склонов, наиболее холодными и морозоопасными - глубокие долины рек, карстовые котловины и воронки.

Для Горного Крыма характерна высокая изменчивость сумм и режима осадков – как пространственная, так и временная. Метеорологические наблюдения показывают, что климат восточных яйл по сравнению с западными является более континентальным, с меньшим количеством атмосферных осадков. Причиной этому являются различия в региональных циркуляционных характеристиках атмосферы и орографии западных и восточных яйл.

От центра максимума годового и зимнего количества осадков (Тюзлер-Ай-Петри) при движении на север и восток уменьшается годовое количество осадков (за счет уменьшения осадков в холодный период), вместе с тем перемещается и максимум осадков по временам года на осень и лето.

Для восточной части Крымских гор годовой ход осадков относится к полуконтинентальному типу с незначительным превышением сумм осадков весенне-летнего периода над осенне-зимним (их соотношение составляет от 1 до 1,75). Максимум осадков здесь наблюдается летом. Для западной части региона характерен неконтинентальный тип годового хода осадков. Сумма осадков в осенне-зимний период здесь в 1,5-2 раза превышает их сумму в весенне-летний период (Климат и опасные, 1982) (рис. 2.5).

Режим увлажнения яйл весьма своеобразен и характеризуется "импульсивностью", когда продолжительный сухой период резко сменяется интенсивными дождями. На Ай-Петри засухи (11 дней без дождя) наблюдались с марта до конца ноября. В среднем отмечается 168 дней с осадками (207 в наиболее влажный год), из них 74 со снегом. При этом 17 дней осадки выпадают с интенсивностью более 20 мм/сут. Осадки на Ай-Петринском плато выпадают в виде дождя (40 %) и снега (60 %). Метеостанция Караби-Яйлы отмечала в среднем 120 дней с осадками (40 из них со снегом). Максимальное число дней с осадками здесь составляет 154. Количество дней с осадками более 20 мм/сут - 11. Засухи в этом районе наблюдались с конца зимы до конца осени (Ведь, 2007).

Дожди на яйлах часто носят ливневый характер. Число дней с осадками более 30 мм/сут в холодный период достигает четырех (до 9 ливней в сутки). Для восточных яйл ливневый характер дождей (0,6 мм/мин, на протяжении 10 мин.) более типичен, чем для западных. Для

Ай-Петринской яйлы максимальное суточное количество осадков – 166 мм – зафиксировано в ноябре. Для этой же станции количество осадков, превышающие 100 мм в сутки, наблюдалось: в январе - 149, июне - 131, августе - 117 и декабре - 146 мм (Кочкин, 1967). В холодный период этот район получает больше осадков, чем в теплый, когда выпадает 79% ливней. Всего в среднем на Карабийском карстовом массиве выпадает осадков почти в два раза меньше (595 мм), чем на Ай-Петринском (1052 мм) (Климат и опасные, 1982).

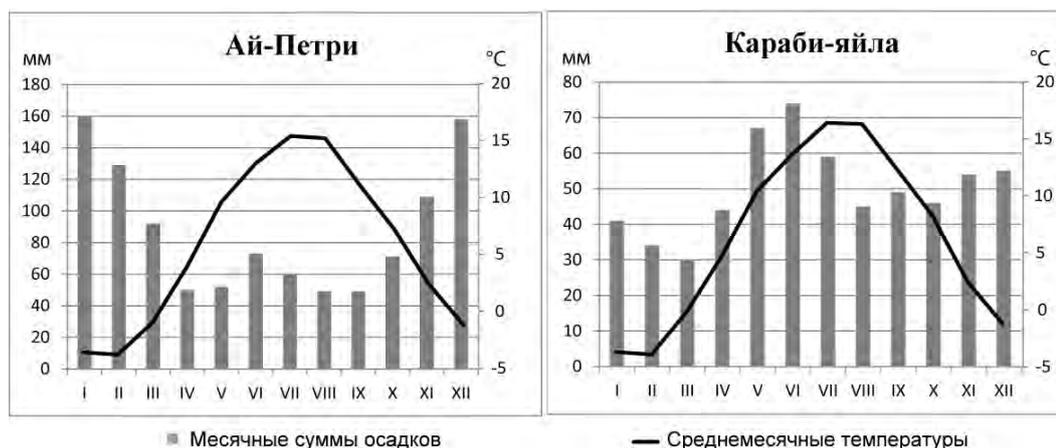


Рис.2.5. Климатограммы по метеостанциям Ай-Петри и Караби-яйла (построены по данным И.П. Веда, 2007)

Работами отдела карстологии и селей ИМР МГ УССР (Шутов, 1971) доказано, что метеостанция Ай-Петри вследствие своего неудачного расположения на бровке плато в среднем недоучитывает 7 % осадков. Учитывая поправки на смачивание стенок осадкомерных ведер и на выдувание, а также на горизонтальные осадки, годовая сумма осадков значительно увеличится и станет равной 1516 мм. С учетом конденсации (7 % от годовой суммы осадков) и испарения (46 % от годовой суммы осадков) на питание подземных вод уходит в среднем 925 мм.

По многолетним данным, средняя высота снежного покрова за зиму для северного склона Крымских гор составляет 8-20 см, южного склона 5-36 см, Ай-Петри и Караби 39-44 см. Наибольшей высоты снежный покров достигает в феврале и первой декаде марта (Кочкин, 1967). Запасы «снеговой» воды для Ай-Петри 135 мм, для Караби - 118 мм. Всего снег даёт 44% осадков зимой. На водоразделах в связи с метелевым переносом его мощность минимальна, а в карстовых воронках и котловинах может достигать более 4 м (Олиферов, Дублянский, 1962).

На основе анализа данных метеонаблюдений в Горном Крыму М.А. Кочкин делает следующие выводы о распределении осадков в зависимости от высоты местности (Кочкин, 1967). На южном макросклоне с увеличением высоты местности количество осадков всюду

увеличивается, но крайне неравномерно в отдельных районах; в интервале отметок от уровня моря до высоты 600-800 м градиент увеличения годового количества осадков составляет 40-50 мм на каждые 100 м высоты, от высоты 600-800 м и до кромки яйлы он составляет менее 20 мм на 100 метров. На северном макросклоне не наблюдается закономерного увеличения количества осадков с увеличением высоты местности; в центральной части Главной гряды высотный градиент годовой суммы осадков составляет до 80 мм на 100 м высоты, в восточной части Главной гряды он не превышает 8-12 мм на 100 м высоты. На вершинных поверхностях Главной гряды (яйлах) выпадает меньше осадков, чем на склонах ниже верхней границы леса; с повышением местности яйл от верхней границы леса годовая сумма осадков уменьшается на 20-200 мм на каждые 100 м высоты. Таким образом, М.А. Кочкин отрицает широко распространенное мнение о том, что наибольшее по Крыму количество осадков выпадает на яйлах.

С точки зрения формирования подземных вод существенную значимость также имеет ветровой режим. Кроме того, что он определяет приход воздушных масс, формирующих атмосферные осадки, ветровой режим также влияет на питание подземных вод посредством горизонтального переноса атмосферных осадков. Последний фактор имеет особое значение в случае твердых осадков, которые подвержены так называемому метелевому переносу.

Средняя скорость ветра на Караби-Яйле составляет 5,9 м/с, на Ай-Петри - 5,7 м/с. Продолжительность сильного ветра (более 15 м/с) достигает на Караби в среднем 80 дней в году, а на Ай-Петри - 85. Максимальное количество дней в году с сильным ветром для Караби - 154, для Ай-Петри - 125. Скорость ветра более 20 м/с на Караби наблюдается 41 день в году, на Ай-Петри – 99. На яйлах ежегодно отмечаются ветры скоростью 40 м/с и более (Ведь, 2007).

Интенсивный метелевый перенос, связанный с преобладающими ветрами, участвует в перераспределении твердых атмосферных осадков и накоплении их в неровностях рельефа. Учитывая, что на карстовых массивах снежный покров может стаивать в течение года от 3 до 10 раз, эти участки становятся местами интенсивной очаговой инфильтрации. Также ветровой режим влияет на водный баланс поверхности массивов, поскольку ветер усиливает испарительный процесс.

#### *Почвенно-растительный покров.*

Кроме климатических особенностей на формирование карстовых подземных вод ГК оказывают влияние факторы, связанные с почвенным и растительным покровом. Почвенно-растительный покров является регулятором поступления атмосферных осадков и поверхностных вод в эпикарстовую зону и в дальнейшем (а также в случае отсутствия первой) – в зону полного насыщения. Кроме того, кислотно-щелочные условия почв обуславливают растворение и вынос твердого материала из нижележащей известняковой толщи и, как

следствие, развитие систем каналовой проницаемости.

Почвенно-растительный покров ГК имеет смысл характеризовать отдельно для северного макросклона, южного макросклона и для водораздельных яйлинских поверхностей. Это разграничение обусловлено резкими различиями климатических условий, наблюдаемых в обозначенных подрайонах. Наибольшее внимание уделяется параметрам, которые определяют водно-физические (водоудерживающая способность) и буферные (поглотительная способность) свойства почв. К ним отнесены мощность (с учетом развитости профиля), механический состав (в том числе скелетность, глинистость), содержание гумуса (в том числе его состав).

Различный характер литологии и расчлененности геолого-геоморфологической основы яйлинской поверхности ГК определяет пестроту почвенного покрова, наличие целой гаммы разновидностей почв: от каменисто-щебнистых до намывных суглинистых. Среди генетических типов наибольшее распространение здесь получили горно-луговые, горно-луговые черноземовидные и горные лугово-степные почвы, а также дерново-карбонатные (перегнойно-карбонатные) почвы (Драган, 2003, 2004; Кочкин, 1967).

На распределение почв активно влияет рельеф поверхности яйл. Этот фактор существенно усиливается влиянием уклона поверхности и экспозиции склонов воронок. Так на водораздельных возвышенностях и склонах южной экспозиции распространены маломощные щебнистые дерново-карбонатные и горные лугово-степные почвы, в понижениях рельефа (днища воронок, котловин) развиты мощные намывные горно-луговые и горно-луговые черноземовидные почвы. Склоны воронок северной экспозиции, покрытые лесной растительностью (составляют 8-10 % территории яйлинских нагорий по оценкам Л.Ф. Каплюк (1973), зачастую заняты горными бурями лесными почвами. В целом почвы яйл отличаются хорошей водопроницаемостью, высокой гигроскопичностью, имеют небольшой диапазон активной влаги (20-30 мм), довольно быстро иссушаются летом и быстро насыщаются весной (Каплюк, 1968). Их хорошие инфильтрационные свойства (коэффициент фильтрации 1,18-1,84 м/сут; (Дублянский, 1967)) способствуют быстрому поглощению дождевых и талых вод. Степень оглиненности является важным показателем, обуславливающим фильтрационные свойства почв и существенно влияющим на буферные свойства почв по отношению к подземным водам. Распределение глинистости яйлинских почв, также как и мощности, контролируется геоморфологическим фактором. Б.Н. Ивановым (1958) для северо-восточной части Ай-Петринского плато была установлена связь почвенных разностей с элементами рельефа. В целом отмечается приуроченность глинистых разностей к карстовым депрессиям и субгоризонтальным поверхностям, а суглинистых разностей к пологим склонам возвышенностей и седловин.

Характеристика физических и водно-физических свойств почв изучаемого района (главным образом, его яйлинской части) дана в работах Л.Ф. Каплюк (1965, 1968, 1973). Исследованиями автора обозначенных работ подтверждено преобладание на яйле в площадном отношении маломощных (до 25 см) скелетных почв в комплексе с эродированными каменистыми. Установлено, что распространенные здесь в меньшей степени горно-луговые черноземовидные и горные лугово-степные почвы (горные черноземы по типологии Л.Ф. Каплюк) имеют тяжелый механический состав (легкая иловато-пылеватая глина с переходом с глубиной в среднюю и тяжелую пылевато-иловатую глину), и в то же время отличаются хорошей водопроходной структурой. Определение полевой влагоемкости показало, что горно-луговые черноземовидные почвы могут максимально удержать в 100-сантиметровом слое 380—390 мм воды. Определение водно-физических свойств маломощной каменисто-щебнисто-глинистой почвы показало, что наименьшая (полевая) влагоемкость мелкозема данной почвы в верхнем 20 см слое составляет 74 мм, что близко по значению к аналогичной константе для мощных почв (77-84 мм). Однако, учитывая что мелкозем (частицы размером <1 мм) составляет в среднем около 50 % объема маломощных почв, а остальные 50 % составляет макроскелет (обломки с размером >10 мм), то реальная полевая влагоемкость этих почв в естественном залегании составляет всего 36 мм (Каплюк, 1968).

Как видно из вышеописанного, почвы, развивающиеся на элювии плотных пород, отличаются от почв на делювиальных отложениях меньшей мощностью профиля и гумусового горизонта, а также большей скелетностью. Для них характерна различная степень оглиненности и скелетности, высокая вариативность мощности, динамичный водный режим.

Представления о растительном покрове ГК изложены в работах Л. А. Приваловой (1956, 1958) и Н. М. Черновой (1951), М.А. Кочкина (1967), Я.П. Дидука (1992), А.В. Ены (2012).

Северный и южный макросклоны Главной гряды в пределах карстовых массивов практически полностью заняты лесной растительностью (за исключением участков обрывов, осыпей и поверхностей отторженных массивов). На северном склоне нижний пояс (до высоты 700-800 м) занят лесами из преимущественно дуба скального и дуба пушистого с кустарниками кизила, грабинника, бересклета, бирючины. Верхний пояс (до яйлинских поверхностей) покрыт грабовыми и буковыми лесами. Высотная поясность растительности южного макросклона несколько иная. Верхний пояс (1000-1300 м) также представлен лесами из бука и сосны обыкновенной. Ниже произрастают сосновые леса из сосны крымской (западная часть Главной гряды) и дубовые леса (восточная часть).

Растительность яйлинских поверхностей карстовых массивов представлена главным образом лугово-степными сообществами. Флора восточных яйл более остепнена, что обусловлено возрастанием к востоку континентальности климата. Древесная растительность

приурочена к убежищам в рельефе – карстовым воронкам, котловинам, долинам. Древесные породы встречаются в понижениях в виде небольших перелесков и рощиц буковых, грабовых или сосновых деревьев среди лугов и луговых степей. Деревья, как правило, имеют угнетенный вид. Исключение составляют сравнительно хорошо развитые буковые и буково-грабовые рощи в карстовых воронках на нижнем плато Чатырдага. Они занимают до 15% площади плато. Кроме того, на плато яйл встречаются кустарники — рябина греческая и крымская, виды шиповника и боярышника, кизил. На Чатырдаге в нижней части пояса растительности яйл относительно обособляется подпояс стланниковых зарослей из лесных видов можжевельников казацкого и полушаровидного. На других яйлах встречаются только их отдельные экземпляры.

На некоторых яйлах значительные площади занимают искусственные лесопосадки. В составе пород посадок преобладает сосна обыкновенная, занимающая 70 % площади всех насаждений в Горном Крыму (Багрова, Лысак, 2000); также широко использовались сосна крымская, береза, ель европейская и другие породы. Только в 1957-1967 гг. – период наиболее масштабных лесомелиоративных работ на яйлах – было посажено искусственных лесных насаждений на территории около 3000 га (Ведь, 2007). Наибольшие площади лесонасаждения занимают на Ай-Петринской, Ялтинской, Никитской, Карабийской яйлах; менее значительные площади заняты лесопосадками на яйлах Демерджинской, Долгоруковской и Тырке. В настоящее время лесные насаждения оказывают заметное влияние на гидрометеорологический режим яйл и, как следствие, на режим питания подземных вод. По занимаемой лесонасаждениями площади (8,76 км<sup>2</sup> – 11,3 % площади плато), как и по естественной залесенности (32,85 км<sup>2</sup> – 42,4% площади плато), Ай-Петринская яйла резко выделяется среди других яйл Горного Крыма (рис. 2.6).

## **2.2. Условия формирования карстовых вод Горного Крыма (по литературным данным)**

Традиционно для подземных вод горных карстовых массивов выделяют такие виды питания, как *инфильтрационное* (рассеянное проникновение в почву или породу атмосферной воды и склонового стока), *инфлюационное* (сосредоточенное проникновение в породу руслового стока постоянных и временных водотоков) и *конденсационное*. Карстовые воронки и другие замкнутые формы рельефа, характерные для экспонированного карста (котловины, увалы, поля) в определенной степени концентрируют поверхностный площадной сток. Прежде всего, это выражается в перехвате ими твердых осадков при метелевом переносе, их накоплении и стаивании, в результате чего в устьях воронок (поглотителях) происходит концентрированная инфильтрация. Таким образом, обозначенные формы рельефа выступают зонами быстрой фильтрации атмосферных осадков. Такая неоднородность условий питания и, в

том числе, фильтрационных условий, требует более подробной детализации инфильтрационного вида питания. В связи с этим в районах экспонированного карста принято выделять площадную инфильтрацию (инфильтрация в общем случае) и очаговую инфильтрацию (инфильтрация в карстовых воронках и прочих подобных формах). Конкретизации также подлежит и инфлюационный вид питания. Выделяют линейную инфлюацию (протяженные участки трещинного поглощения, пересекаемые тальвегами водотоков, без крупных поглотителей) и очаговую инфлюацию (точечное поглощение водотока понорами, обычно происходящее у литологического или тектонического контакта) (Дублянский, Кикнадзе, 1984). В зарубежной карстологической литературе выделяют автогенный и аллогенный виды питания КПВ (Ford, Williams, 2007, Ravbar, 2007). Автогенное питание происходит *in situ*, то есть атмосферные осадки поглощаются непосредственно в месте их выпадения. Аллогенное питание происходит при поглощении водотоков, водосбор которых удален от места поглощения (находится выше, обычно на некарстующихся породах). Исходя из этих определений, автогенное питание, как правило, соответствует инфильтрационному питанию, аллогенное – инфлюационному.

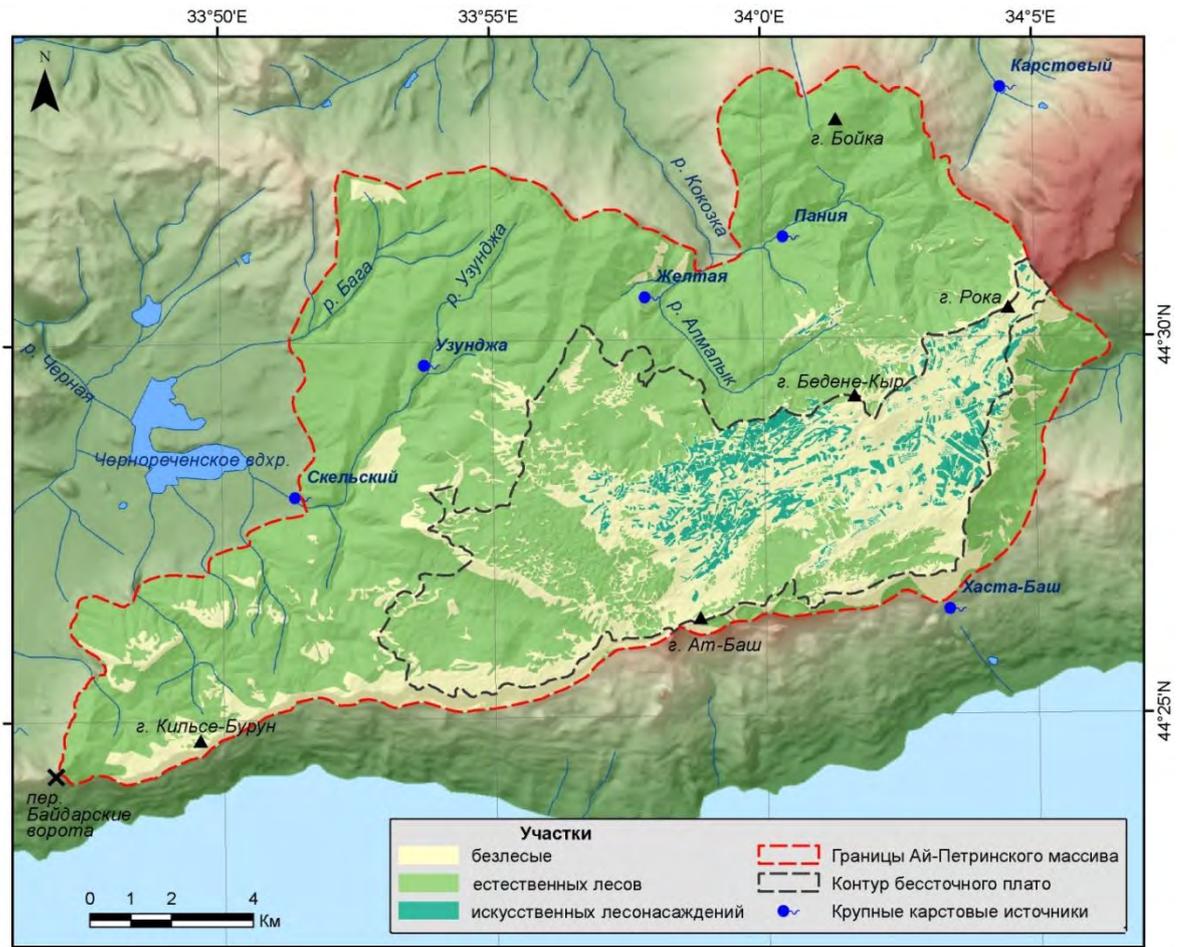


Рис. 2.6. Залесенность Ай-Петринского массива (построен на основе анализа космоснимков).

*Инфильтрационный* вид питания преобладает на участках голого и задернованного карста. В местах развития голого карста атмосферные осадки попадают в горную породу напрямую, потери на испарение имеют небольшие значения, инфильтрационное питание карстовых воды происходит на протяжении всего года. На участках развития задернованного карста существенное влияние на величину питания оказывает почвенный покров.

Детальные исследования фильтрационных свойств почвенного покрова были проведены на плато карстового массива Ай-Петри В.Н. Дублянским (1967). Было установлено, что глубина промачивания почвы при осадках до 10 мм/сут не превышает 15 см, до 20 мм/сут – 25 см, до 30 мм/сут – 45 см. Принимая во внимание малое количество дней летнего периода (май-октябрь) с обильными дождями (всего лишь 4,3 дня с осадками 20 мм и более по многолетним метеонаблюдениям), В.Н. Дублянский делает вывод о низкой величине питания в этот период. Согласно этим выводам, на участках с почвенным слоем мощностью более 50 см осадки теплого периода практически полностью расходуются на испарение и не участвуют в питании подземных вод. Полученные В.Н. Дублянским данные свидетельствуют о том, что наличие на известняках даже минимального по мощности почвенного покрова (5–10 см) вносит существенные коррективы в величину площадного инфильтрационного питания подземных вод в различные месяцы. Величина питания подземных вод с равных по площади водосборов, имеющих разную мощность почв, различна. При мощности почв менее 30 см питание подземных вод может происходить и в теплый период. При мощности почв 50 см на питание подземных вод в течение года идет 56,5 % выпавших осадков, при мощности 30 см – 62 %, при мощности 10 см – 71,0 % (Дублянский, 1967). В то же время И.П. Ведь (2007) отмечает, что на платообразных поверхностях ГК наибольшее распространение имеют маломощные почвы (20–30 см). Вследствие небольшой влагоемкости они могут промачиваться на всю глубину профиля даже при небольшом количестве осадков, обеспечивая питания подземных вод и в теплый период.

Более сложен расчет инфильтрационного питания для участков массива, покрытых лесом (Ведь, 1970). За счет выпадения горизонтальных осадков (гололед, изморозь, наморозь, роса), не учитываемых метеостанциями, лес получает дополнительно более 250 мм влаги (25 % годовой суммы осадков для плато Ай-Петри). С этих участков не происходит зимой выдувания снега. Поэтому, несмотря на значительные потери на транспирацию, уголья, занятые лесом, питают карстовые воды на протяжении всего года. Величина питания составляет 55–65 % нормы осадков (Приблуда и др., 1979).

Важный аспект оценки роли инфильтрационного питания при расчете водного баланса – определение неравномерности покрытия территории выпадающими осадками. Для жидких

осадков эта неравномерность носит первичный характер и зависит от рельефа, положения по отношению к направлениям движения воздушных масс, залесенности, удаленности от моря и прочее. Для твердых осадков неравномерность покрытия территории может носить как первичный, так и вторичный характер. Первичная неравномерность наиболее четко проявляется в распределении снеготоплив по высоте, носящем характер высотной поясности. Вертикальный градиент снеготоплива составляет для конца декабря 7, а для конца января – 14 мм/100 м. В феврале-марте градиент увеличивается до 21–24, в отдельных случаях до 47 мм/100 м. Максимальные снеготопливы формируются в феврале. В Горном Крыму снежный покров неустойчив и может полностью стаять в отдельные зимы 5–7 раз (Дублянский, Кикнадзе, 1984).

Вторичная неравномерность возникает при ветровом перераспределении снега, которое наблюдается на участках, лишенных леса, и при неравномерном стаянии снега на разных по экспозиции элементах карстового рельефа. При ветровом переносе снега происходит его локализация в понижениях рельефа – воронках, тальвегах временных водотоков, под структурными уступами. По итогам регулярных снеготопливомеров, проводимых на Ай-Петри в 1957–1964 гг., установлено, что в понижениях рельефа запасы воды в снеге в 3–4 раза превышают таковые на возвышенных участках (Дублянский, 1968). Концентрация снега в карстовых воронках и его частое многократное стаяние в течение зимы и ранней весны создают условия для непрерывного очагового инфильтрационного питания (Дублянский, Кикнадзе, 1984). Условия для очаговой инфильтрации также создаются в днищах открытых колодцев и шахт, где происходит накапливание снега.

*Инфильтрационное питание* КППВ в Горном Крыму распространено довольно ограничено и, в целом, по сравнению с инфильтрационным питанием, имеет меньшее значение. Тем не менее, на отдельных участках его роль весьма значительна.

Очаговая инфильтрация относительно постоянных поверхностных водотоков в ГК известна только в двух местах. Одно находится на Долгоруковском плато в месте перехода ручья Суботхан в подземный поток пещеры Кизил-Коба. Второе имело место на Ай-Петринском в котловине Бештекне, где водоток, берущий начало от источников в южной части котловины, поглощался понором в основании ее северо-западного борта (в настоящее время водоток зарегулирован – огражден от понора плотиной).

Периодическая очаговая инфильтрация возможна на многих участках: как на плато, так и на склонах массивов. Поглощение периодических потоков, формирующихся в ложбинах, балках, оврагах и ущельях происходит при ливнях и бурном снеготаянии (2–3 раза в год). Временный поверхностный сток в линейных понижениях рельефа наблюдается на весьма незначительных расстояниях (десятки-сотни метров) и поглощается зияющими трещинами, понорами и изредка

провальными формами на днищах и бортах эрозионных врезав. В зимний период временные водотоки могут формироваться по поверхности снега и таким образом преодолевать зоны трещиноватости, поглощающие поверхностный сток летом.

Некоторое количество поверхностного стока поглощается воронками с зияющими понорами. Так, например, для Никитского плато на 126 воронок зияющими понорами обладают только 14 с суммарной площадью 0,4% от площади плато (8,2 км<sup>2</sup>). Примерно такое же соотношение наблюдается и на других плато, что при незначительном испарении осадков позволяет считать лишь 1% от их количества поглощаемым инфлюационным путем на плато (Шутов, 1971).

Линейная инфлюация с поглощением в зонах повышенной трещиноватости близ разрывных нарушений характерна для большинства постоянных и периодических водотоков, берущих начало на плато и склонах Главной гряды. Ярким примером линейной инфлюации является р. Узунджа, которая берет начало в северо-западной части Ай-Петринского массива на склонах, обращенных к Байдарской котловине. Детальные карстолого-гидрометрические работы выявили 6 участков линейной инфлюации протяженностью 200-400 м, тяготеющих к зонам тектонических нарушений, пересекающих долину. Аналогичная картина наблюдается и на фрагменте р. Черной, расположенном в Чернореченском каньоне (Шутов, 1971). Такие же зоны линейной инфлюации были выявлены на реках Боса, Календа, Арманка, Бага, Байдарка, Учан-Су, Дерекойка, Гува, Зуя, Бурульча, Кучук-Карасу (Ресурсы поверхностных вод, 1966).

В теплое время года значительное влияние на формирование карстовых вод может оказывать конденсация в трещинно-каналовых коллекторах, что широко отмечается в Горном Крыму (Вахрушев, 2001). В 1960-70 гг. была разработана методика расчета конденсации по микроклиматическим наблюдениям в карстовых полостях (Дублянский, 1969). Результаты исследований по этой методике проведены двумя независимыми (гидрометрическим и балансовым) методами (Дублянский, 1977). Они показали, что модуль конденсационного стока в расчете на год составляет 1,77 л/с·км<sup>2</sup>. Это около 7 % годового количества осадков. Учитывая, что конденсация представляет сезонный процесс, длящийся около 150 дней в году, правомерен расчет сезонного модуля стока, который может достигать 4-6 л/с·км<sup>2</sup>. Если при этом в расчет брать эффективные осадки (осадки минус испарение), приходящиеся на этот сезон, то доля конденсационного питания увеличивается до 90%. В.Н. Дублянский (1969, 1977) полагал, что межсезонный сток многих карстовых источников, формирующийся в период отсутствия дождей, поддерживается исключительно за счет конденсационных вод. В этих представлениях, однако, не учитывалась выявленная в последние два десятилетия (Климчук, 1989, 2009; Williams, 1983; Klimchouk, 2004) питающая роль эпикарстовой зоны карстовых массивов. Согласно этим представлениям подземный сток карстовых массивов в теплый (засушливый) период

поддерживается преимущественно за счет сработки запасов вод «подвешенного» эпикарстового горизонта, сформированных в предшествующий влажный период.

*Залегание, движение и разгрузка.*

В связи с обозначенными особенностями гидрогеологии карста для ГК характерна высокая неоднородность плановой структуры подземного стока, что является следствием высокой неоднородности и анизотропии емкостных и фильтрационных свойств закарстованных пород. Предпосылками развития такой неоднородности является неравномерное распределение начальной трещиноватости горных пород, инициирующей дальнейшее развитие каналов. В случае горных массивов и межгорных бассейнов ГК ведущая роль в развитии каналовой проницаемости принадлежит тектонической трещиноватости. Так, по результатам исследований Лаборатории карстоведения и спелеологии (Симферополь) в 90-х гг. XX в., установлено, что на яйлинских массивах в зонах приразрывной трещиноватости разных порядков располагается до 40% карстовых полостей (Дублянский и др., 1991). По данным И.Н. Васильева (Васильев, 1971б) из известных в юго-западной части ГК в начале 70-х гг. прошлого столетия 327 карстовых полостей 261 полость заложена исключительно по тектоническим трещинам, а в формировании остальных 66 полостей тектоническая трещиноватость также играет важную роль. В.Н. и Г.Н. Дублянские указывают, что в пределах приразрывных зон располагается 62% коррозивно-эрозионных полостей (Дублянский, Дублянская, 1996). В связи с этим в ГК исследователями отмечается высокое гидрогеологическое значение разрывных нарушений (Васильев, 1971а, 1971 б; Дублянский, Дублянская, 1996; Лущик и др., 1997).

Разрывные нарушения выполняют двоякую гидрогеологическую функцию. С одной стороны, приразрывные зоны являются основными дренами подземных вод и характеризуются, в связи с этим, повышенной обводненностью; с другой стороны, разрывы, в связи с низкой водопроницаемостью их центральных осевых частей, выполняют функцию барражей, что препятствует водообмену между разграниченными разрывами соседними блоками пород. Двоякая гидрогеологическая функция разрывных нарушений в ГК подтвердилась при проходке Ялтинского гидротоннеля (Васильев, 1971б).

Ширину зоны высокой водопроницаемости ( $S_3$ , м) можно определить по протяженности разрыва ( $l$ , м) из эмпирического соотношения:  $\lg S_3 = 0,77 \lg l - 1,20$  (коэффициент корреляции  $r=0,70$ ), предложенного в работе А.С. Алешина с соавторами (Алешин и др., 1982). Для разрывов глубокого заложения, имеющих в пределах региона длину до 60 км, расчетная ширина зоны составляет 300 м, для межблоковых разрывов средней длиной 20 км – 130 м, для внутриблоковых разрывов длиной от 1 до 14 км – 60 м (Дублянский и др., 1991).

И.Н. Васильев (1971б) по результатам изучения восьми обводненных сбросов, обнаруженных при проходке Ялтинского гидротоннеля, вывел эмпирическую зависимость

ширины обводненных трещиноватых приразрывных зон ( $l$ ) от амплитуды смещений ( $A$ ):  $l = 27 + 0,77A$  (коэффициент корреляции  $r=0,89$ ).

Повышенная обводненность приразрывных зон была обнаружена при бурении скважин в Байдарской долине. Наиболее водообильными (средний дебит  $11 \text{ м}^3/\text{час}$ ) оказались скважины, пробуренные в опущенных блоках на расстоянии до 300 м от сместителя. Менее обводнены ( $1,2 \text{ м}^3/\text{час}$ ) скважины, расположенные в приподнятых блоках. Меньше всего воды дают скважины, пробуренные в центральных частях блоков на расстоянии более 300 м от сместителя ( $0,005 \text{ м}^3/\text{час}$ ) (Дублянский, Дублянская, 1996).

Для выяснения направления движения КПВ необходимо изучение гидродинамических связей между отдельными водосборами в области питания и крупными источниками в области разгрузки. Для их установления в условиях карста наиболее эффективными являются спелеологический и индикаторный методы.

Спелеологический метод предусматривает проникновение вглубь массива через карстовые полости (пещеры), являющихся частями различных звеньев карстовых водообменных систем: пещер-поноров (начальное звено КВС), пещер-источников (конечное звено КВС) и пещер, вскрывших транзитную часть КВС. Для понимания современных условий движения КПВ наибольший интерес представляет изучение гидрологически активных пещер, в отличие от реликтовых карстовых полостей, являющихся индикаторами палеогидрогеологических условий. Спелеологические исследования должны сопровождаться топографической съемкой полостей, а также картированием и описанием всех имеющихся в них значительных водопроявлений (подземных водотоков, точек их появления и поглощения, участков активной капели и т.д.). Наиболее полную картину динамики КПВ в пределах отдельных массивов дает изучение пещер, пройденных от начального до конечного звена КВС. В ГК на данный момент единственной известной из таких является пещерная система Красная-Голубиная (рис. 2.7).

В 60-80-е гг. прошлого столетия в карстовой области Горного Крыма было проведено более 30 индикаторных экспериментов (Дублянский, Кикнадзе, 1984; Дублянский, 1977). В качестве индикатора использовался флуоресцеин. Запуск красителя производился как в поверхностные водотоки, поглощаемый зонами тектонической трещиноватости, так и в карстовые полости на глубине 400-500 м (пещеры Каскадная, Солдатская).

Результаты индикаторных экспериментов в юго-западной части ГК указывают на центробежный характер растекания КПВ (рис. 2.8). Источники Скельский, Пания, Хаста-Баш находятся в «фокусе» разгрузки подземных вод из смежных тектонических блоков. Вдоль крупных тектонических нарушений в отдельные сезоны отмечается весьма далекий разнос красителя, иногда происходящий в противоположные стороны. По итогам опытов были

уточнены границы Западного, Центрального и Восточного Ай-Петринских подрайонов, подтверждена идея об относительной гидравлической изолированности блока Скульской пещеры от источника Скульского. Доказано существование крупной КВС, связанной со Скульским источником, и наличие перетока воды из II, через III в IVa гидродинамическую зону под некарстующиеся отложения Байдарской котловины. Подтверждено существование небольшой по размерам КВС в районе Узунджинской пещеры. Обнаружено, что воды Ялтинского массива разгружаются на северном и южном склонах Ай-Петринского массива (Дублянский, 1977).

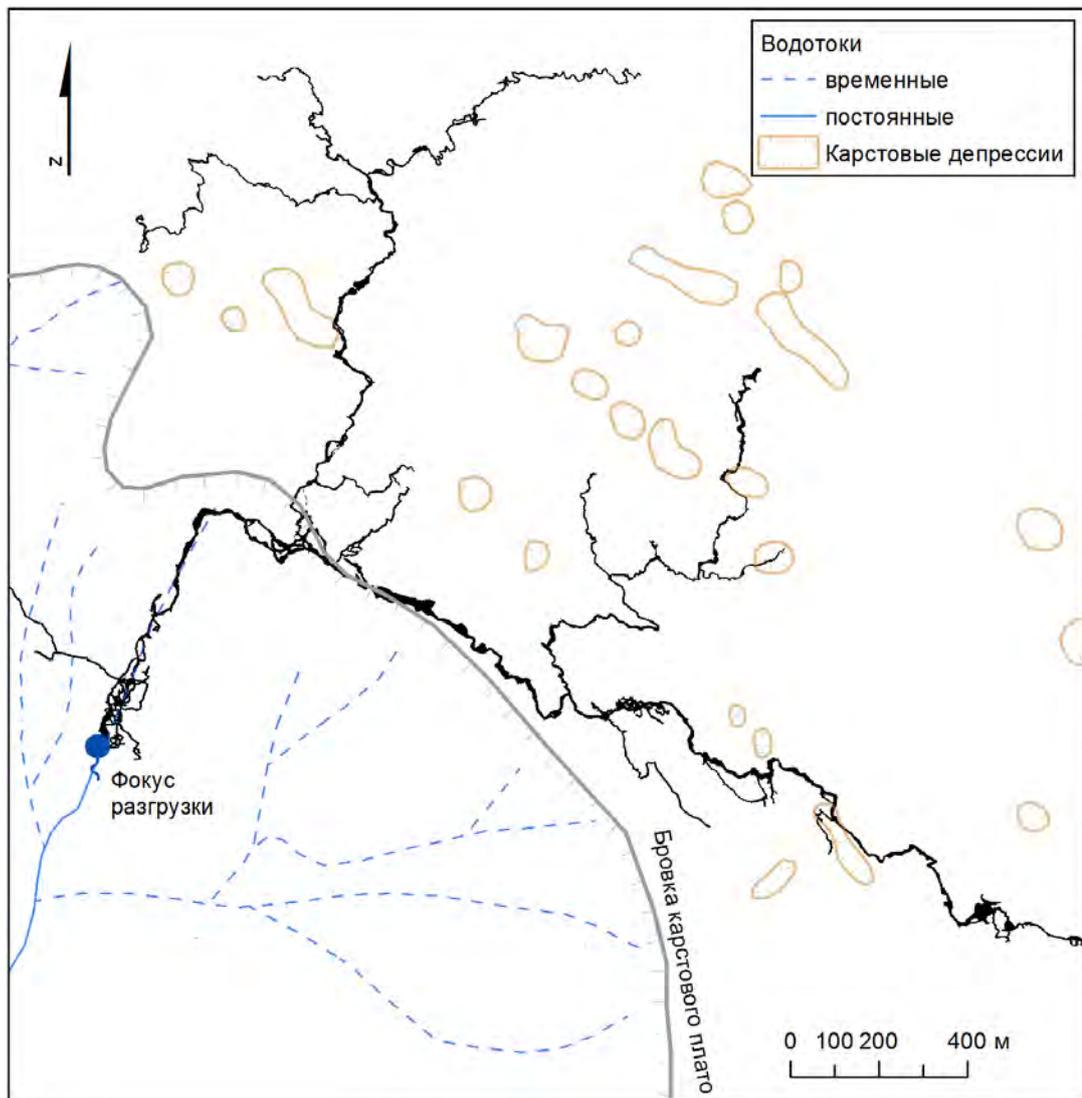


Рис. 2.7. План карстовой водообменной системы пещер Красная-Голубиная (показан черным цветом) на орографической схеме западной части Долгоруковского массива.

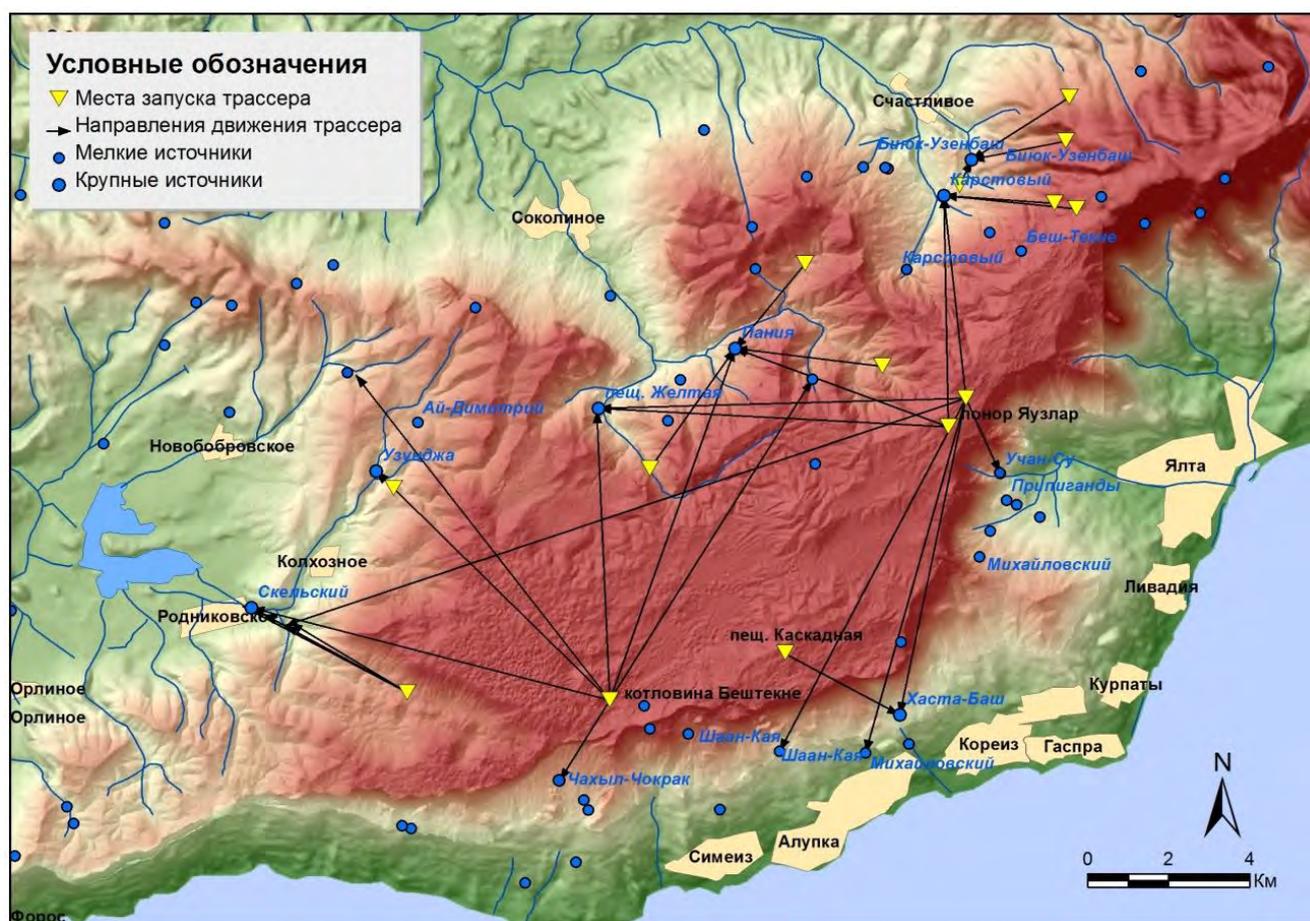


Рис. 2.8. Схема индикаторных опытов на Ай-Петринском и Ялтинском массивах (построена по данным Дублянского, Кикнадзе, 1984; Дублянского, 1977).

На восточных массивах ГК результаты индикаторных опытов также в некоторой мере помогли прояснить картину циркуляции КПВ (рис. 2.9). Эксперименты на Долгоруковском массиве подтвердили связь водосбора периодического водотока р. Суботхан, поглощающейся в трещинных понорах близ пещеры Провал, с подземной рекой Красной пещеры. Установлена связь подземного водотока, формирующегося в пещере Марченко, с источником пещеры Алешина вода. На Карабийском массиве отмечен центробежный разнос красителя на разных уровнях. Подземные потоки из поглотителя в верховье р. Суат и из буровой скважины в южной части массива «перекрещиваются» на разной глубине с потоком из пещеры Солдатской. На северном склоне массива наблюдается такое же растекание, очевидно происходящее вдоль тектонического нарушения, срезающего с севера Карабийский массив. В то же время индикаторные опыты не позволили точно определить пути движения вод к главному «фокусу» разгрузки массива – источнику Карасу-Баши (Дублянский, Кикнадзе, 1984).

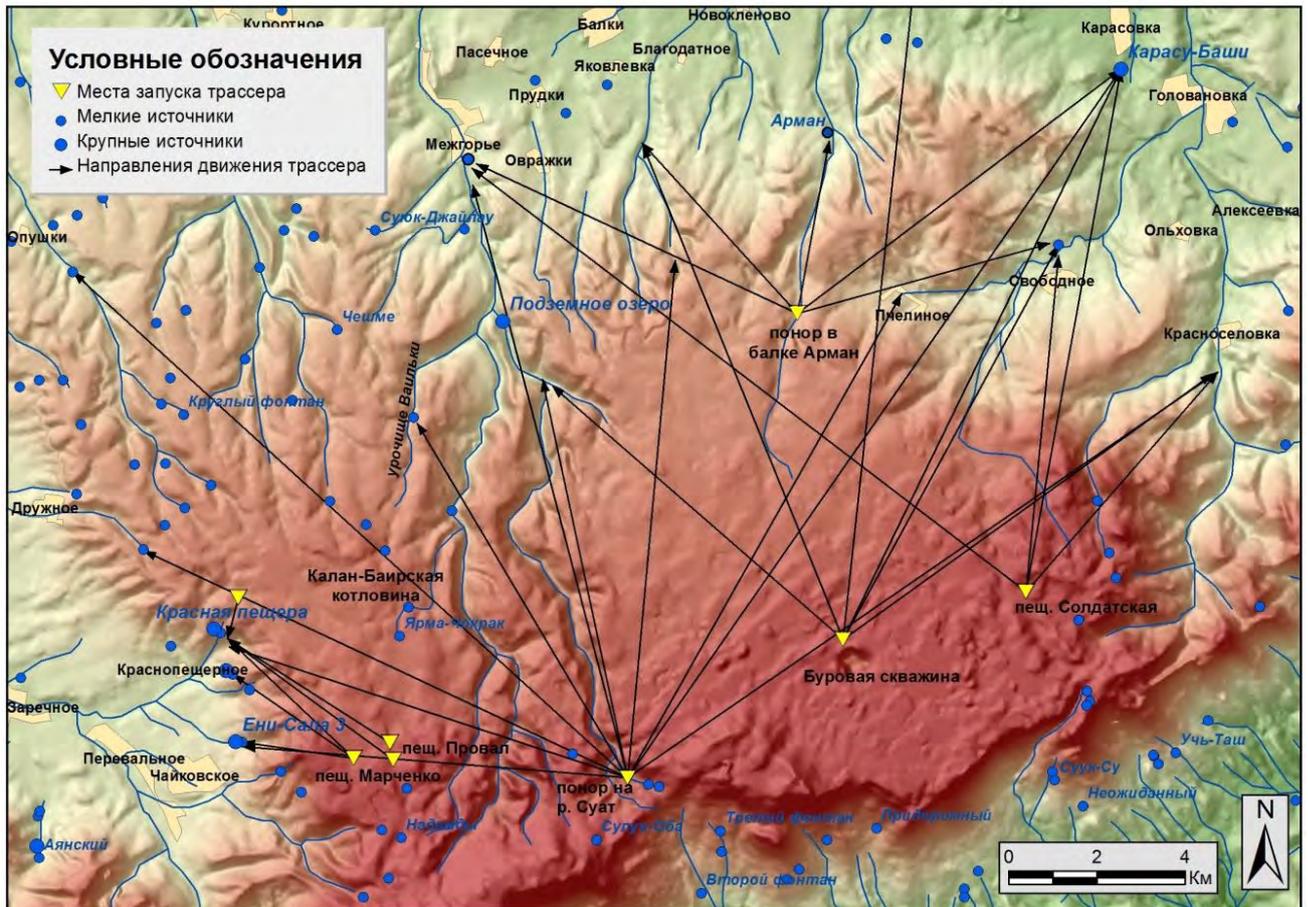


Рис. 2.9. Схема индикаторных опытов на Долгоруковском и Карабийском массивах (построена по данным Дублянского, Кикнадзе, 1984; Дублянского, 1977).

Следует отметить, что результаты проведенных в ГК индикаторных опытов следует использовать с осторожностью. Проведенные эксперименты носят полуколичественный характер. Как известно, степень их надежности уменьшается с увеличением количества экспериментов, проведенных на одном массиве. Это объясняется задержкой красителя в изолированных подземных резервуарах, его оседанием на стенках карстовых полостей и трещин с последующим выносом в карстовые источники с паводками в течение нескольких последующих лет, что делает проблематичным проведение последующих экспериментов с тем же красителем.

Важным условием для самоочищения подземных вод от загрязнений является скорость их движения. Скорость КПВ в ГК определялась четырьмя методами (Дублянский, Кикнадзе, 1984). Наиболее высокие скорости (до 3 м/с) были получены при прямых гидрометрических замерах вертушкой в сужениях русел подземных водотоков (пещеры Красная, Алешина вода, Аянская). Более низкие скорости (до 1 м/с) получены седиментологическим методом Хьюлстрема-Буркхардта. Эти данные характеризуют условия транспорта и отложения пещерного аллювия на значительных участках подземных русел длиной 50-200 м (пещеры Красная, Мисхорская).

Еще меньшие скорости получены при анализе скорости добегания волны паводка (Красная пещера, 0,4 м/с). Наименьшие скорости получены с использованием индикаторных методов. По результатам экспериментов по трассированию КПВ в Горном Крыму средняя скорость их движения составляет 3350 м/сут (0,04 м/с). Однако эту оценку можно считать заниженной, поскольку регистрация времени прихода трассеров в пункты наблюдений в большинстве экспериментов была малодискретной (обычно раз в 4 дня), а эксперименты далеко не всегда проводились в периоды высокой обводненности. Впрочем, полученные с использованием последнего метода значения сопоставимы с полученными путем трассирования скоростями КПВ в других регионах мира. Так, по данным 280 экспериментов в Югославии Миланович указывает среднюю скорость движения КПВ 0,06 м/с; по данным 65 опытов в Западной Европе Жез получил скорость 0,03 м/с; Уорсингтон на основании результатов 2877 экспериментов в разных регионах мира получил среднюю скорость канального стока 0,022 м/с (Климчук, 2008).

КПВ ГК характеризуются неустойчивым внутригодовым гидродинамическим режимом. В.Н. Дублянский (1977) отмечает, что значительные колебания уровня воды происходят во всех звеньях КВС. Их значения, отмеченные в карстовых полостях, достигают 10 м и более (пещеры источники Карасу-Баши и Джур-Джур – 5, Аянская – 6, Красная – 7, Ени-Сала III – 8,5, Кирилловская – 10 м; шахта Каскадная – 13 м). Наибольший для ГК подъем уровня отмечен в Скельской пещере – 45 м. Сравнимое значение колебания уровня вод отмечено в пещере-источнике Мамут-Чокрак (около 30 м). Колебания уровня до 34 м отмечены в скважинах межгорного артезианского бассейна Байдарской котловины (Чуринов, 1959). Отмеченные значительные колебания КПВ в ГК обусловили выделение III гидродинамической зоны (эпифреатическая зона, или зона сезонных колебаний уровня).

Разгрузка КПВ ГК происходит через многочисленные источники, которых известно более 2500 (Дублянский, Дублянская, 1996). Источники с расходом свыше 10 л/с составляют всего 3,7%, но через них проходит более 83% подземного стока. При этом 19 источников с индивидуальными расходами более 100 л/с имеют суммарный дебит более 75 % от общего родникового стока (Дублянский, Кикнадзе, 1984). Эти данные указывают на связь крупнейших источников с КВС. Среднемноголетние расходы двух источников (Карасу-Баши и Скельского) превышают 1 м<sup>3</sup>/с. Максимальный расход достигает 10 м<sup>3</sup>/с и более (до 40 м<sup>3</sup>/с у Карасу-Баши).

В карстовых массивах и бассейнах может наблюдаться склоновая, долинная и подводная (субмаринная) разгрузка. Первые два вида разгрузки свойственны цокольным, а последние два – опущенным карстовым массивам и бассейнам (Дублянский, Кикнадзе, 1984). В ГК отмечены все указанные виды разгрузки КПВ.

Значительные очаги субмаринной разгрузки карстовых вод известны на участке Балаклава-Форос, в частности в районе мыса Айя (Климчук и др., 2007). Расход некоторых таких выходов по расчетам специалистов достигает 10 тыс. м<sup>3</sup>/сут и более (Кондратьев и др., 1998; Юровский и др., 2000).

Источники Горного Крыма различаются по условиям выхода (из верхнеюрских известняков, глыбовых навалов, делювиальных отложений), высоте выхода (от 1300 до – (10-20) м по отношению к уровню моря), дебиту (от долей л/с до 40 м<sup>3</sup>/с), типу режима (Дублянский, Кикнадзе, 1984).

Режим нескольких сотен источников Горного Крыма изучается с 1945 г. В большей степени изучены источники Южного берега Крыма (Альбов, 1970). Тем не менее, режим карстовых источников ГК изучен недостаточно. Установлено, что колебания расходов источников с запаздыванием от суток до нескольких месяцев повторяют колебания режима осадков. По отношению максимального расхода к минимальному выделяются источники флюационного, смешанного и фильтрационного типов (коэффициенты изменчивости 20-50, 6-20 и 1-2 соответственно) (Неклюдов, 1969). Все крупные карстовые источники с расходом более 100 л/с относятся к флюационному типу. Характерная динамика расходов таких источников иллюстрируется гидрографом (рис. 2.10).



Рис. 2.10. Динамика расхода карстового источника Хастабаш в период 1990-1995 гг. на фоне месячных сумм осадков (построен по фондовым материалам ЯГГИП).

Высказывается предположение, что водность некоторых крупных карстовых источников формируется за счет расходования водных запасов предыдущих лет (Глухов, 1948, 1960). Р.А. Филенко предприняла попытку обосновать это предположение на основе статистического анализа многолетних данных атмосферных осадков и расходов крупных рек ГК, имеющих карстовое питание (Филенко, 1949).

### **2.3. Данные новейших авторских исследований (по результатам полевых работ)**

#### **2.3.1. Многолетний мониторинг режима атмосферных осадков и карстовых вод**

Для уточнения условий формирования КПВ ГК нами с 2009 г. ведется мониторинг изотопного состава (содержание  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$ ) атмосферных осадков и подземных вод. Атмосферные осадки (недельные и месячные суммы) отбираются с самого начала наблюдений на двух станциях: в г. Симферополь и на массиве Чатырдаг, с 2016 г. также и на третьей станции – в г. Алупка. В Горном Крыму было опробовано более 30 проявлений карстовых вод, некоторые из которых опробовались многократно в различные сезоны года и фазы водности (рис. 2.11). Отбор проб атмосферных осадков проводился по методике GNIP. Определения содержания  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  производились в Институте геологии Университета г. Инсбрук (Австрия) и в Ресурсном центре рентгено-дифракционных методов исследования (РЦ РДМИ) СПбГУ на лазерном изотопном анализаторе Picarro L2120-i с использованием стандартов МАГАТЭ и Американского геологического общества V-SMOW-2, USGS45 и USGS46. Погрешность измерений составляет  $\pm 0.13$  ‰ по  $\delta^{18}O$  и  $\pm 1.5$  ‰ по  $\delta D$ . Результаты измерений приводятся в промилле относительно стандарта океанической воды V-SMOW.

Результаты проведенных нами изотопных исследований атмосферных осадков и карстовых вод в ГК опубликованы в научных статьях (Дублянский и др., 2012, Dublyansky et al., 2018, 2019).

Многолетний мониторинг изотопного состава атмосферных осадков, проводимый нами, создал основу для дальнейшего применения метода стабильных изотопов при изучении структуры и динамики стока КПВ. По результатам режимных наблюдений 2010-2014 гг. получено уравнение локальной линии метеорных вод (ЛЛМВ) для северного склона Крымских гор:  $\delta D = 7,3 \cdot \delta^{18}O + 4,8$ . Вычислены высотные градиенты изотопных значений, составившие  $-0,17 \pm 0,07$  ‰ / 100 м для  $\delta^{18}O$  и  $-1,0 \pm 0,8$  ‰ / 100 м для  $\delta D$ , что дает возможность определять высотное положение области питания для различных проявлений подземных вод. По результатам анализа корреляции хода изотопного состава атмосферных осадков с различными факторами выяснено, что основное влияние на его формирование оказывают температура воздуха и источник влаги. Основными источниками поступления влаги на Крымский полуостров, выясненными по результатам лагранжева моделирования (Lagrangian modeling),

являются окружающая суша (49 % от всей суммы осадков), Средиземное море (15,3 %), Черное море (14,4 %) и Атлантический океан (13,7 %).

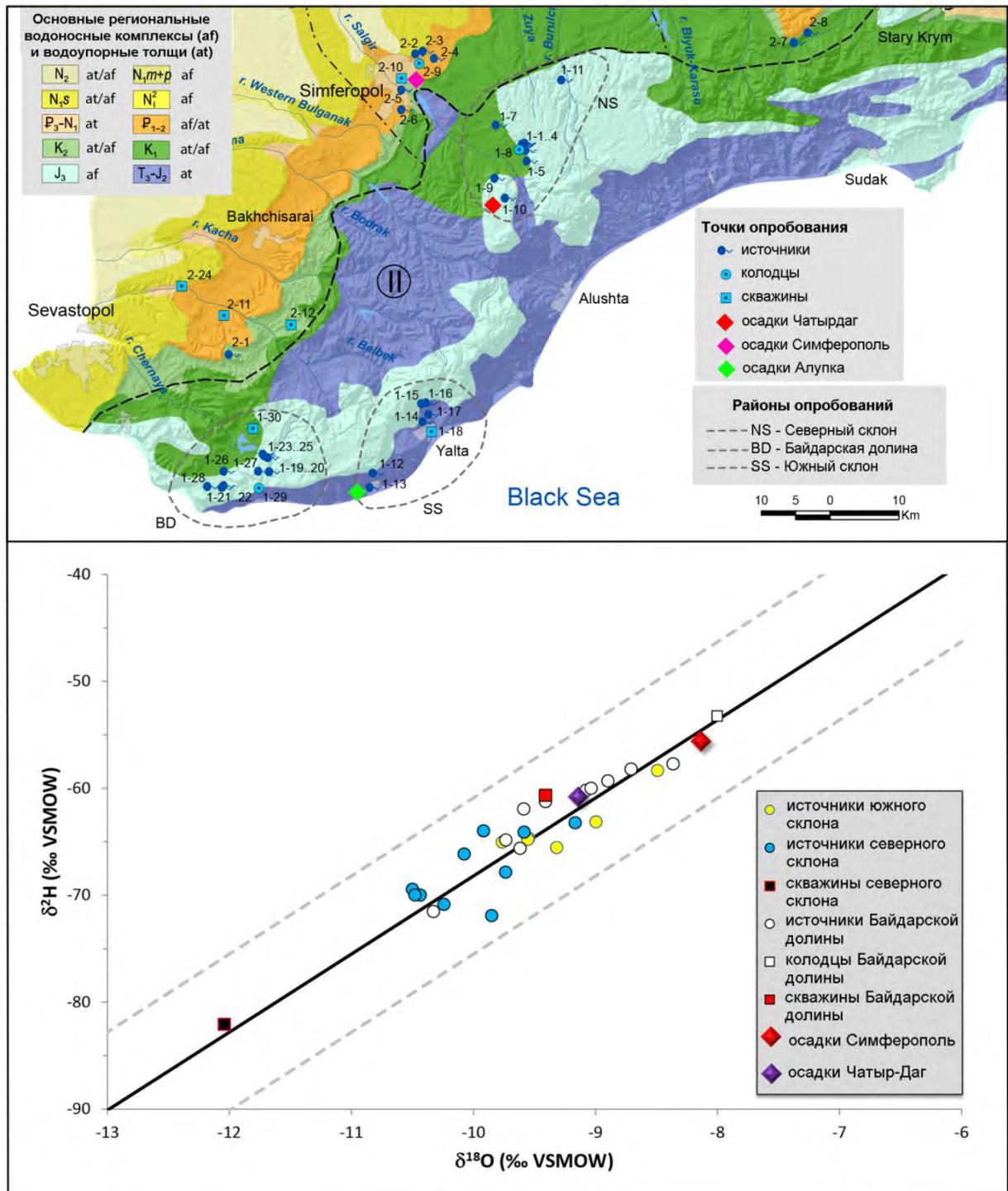


Рис. 2.11. Карта точек опробований атмосферных осадков и подземных вод в Горном Крыму на изотопный состав (верхняя панель) и результаты анализа на локальной линии метеорных вод (нижняя панель). ЛЛМВ показана черной сплошной линией, серыми прерывистыми линиями показан «коридор» в  $\delta^{18}O = 1$  ‰.

Как было выяснено, состав стабильных изотопов кислорода и водорода в КПВ ГК имеет свои особенности. Воды карстовых источников характеризуются довольно узким диапазоном значений изотопного состава:  $\delta^{18}\text{O} = -10,5..-8,0 \text{ ‰}$ ,  $\delta\text{D} = -72..-58 \text{ ‰}$  (рис. 2.11). При том, что состав атмосферных осадков в области питания изменяется в довольно широких пределах ( $\sim 60 \text{ ‰}$  для  $\delta\text{D}$  и  $\sim 7 \text{ ‰}$  для  $\delta^{18}\text{O}$  по данным исследований 2009-2012 гг.), воды крупных карстовых источников демонстрируют стабильный изотопный состав в течение всего периода (для источника Красной пещеры за тот же период  $\delta\text{D} = -70,0 \pm 1,5 \text{ ‰}$  и  $\delta^{18}\text{O} = 10,4 \pm 0,3 \text{ ‰}$ ). Эта закономерность наглядно представлена на рис. 2.12. В погруженных блоках карстовых массивов ГК, в зоне напорных вод замедленного водообмена, как правило, встречаются воды с близким составом (скважины в Байдарской котловине). В краевых блоках массивов в единичных случаях обнаружены воды с более «легким» изотопным составом (вода из скважины ниже Красной пещеры имеет состав  $\delta\text{D} = -83,0 \pm 1,0 \text{ ‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O} = -12,9 \pm 0,2 \text{ ‰}$ ), что, скорее всего, связано с их древним (доголоценовым) возрастом.

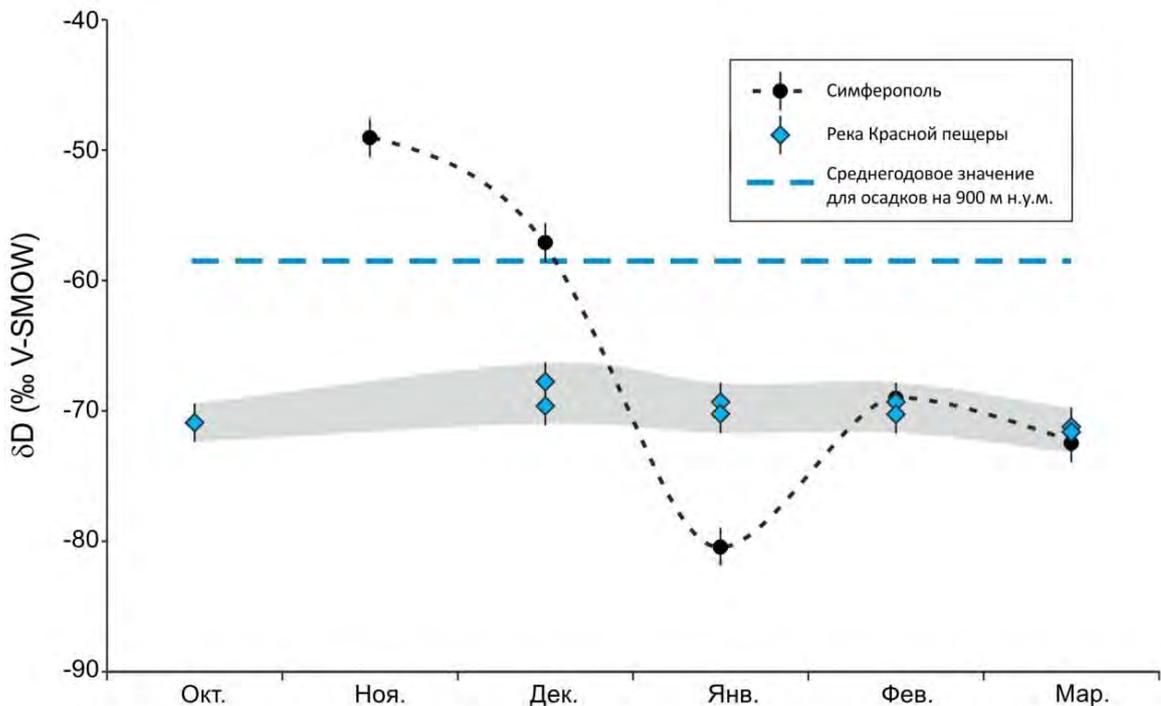


Рис. 2.12. Изотопный состав ( $\delta\text{D}$ ) воды подземной реки в Красной пещере с октября 2009 г. по март 2010 г. (Дублянский и др., 2012).

Наши исследования, касающиеся изучения изотопного состава КПВ ГК и атмосферных осадков в области их питания, подтвердили предыдущие выводы В.Н. Дублянского (1967) о низкой величине питания в летний период года. Изотопный состав вод крупных карстовых источников (Краснопещерный, Аянский, Скельский), оставаясь стабильным в течение года

независимо от уровня водности, гораздо «легче» среднегодового состава атмосферных осадков в области питания. По соотношению стабильных изотопов Н и О вода карстовых источников находится ближе к осадкам зимнего периода, чем к осадкам, осредненным за год (рис. 2.10). Очевидно, в режиме питания КПВ ГК резко преобладают осадки холодного периода. В теплый же период существенное питание подземных вод может происходить только после сильных ливней или продолжительных осадков меньшей интенсивности, что также довольно часто имеет место в ГК (продолжительные дождливые периоды в мае и июне, сильные ливни в августе).

Для выяснения буферной функции эпикарстовой зоны нами была разработана и выполнена программа мониторинга изотопного состава эпикарстовых вод на массиве Чатырдаг. В течение зимы 2018 г. – лета 2019 г. производился ежемесячный отбор капёжной воды в пещерах Мраморная и Эмине-Баир-Хосар. Мощность эпикарстовой кровли в точках отбора составляла от 10 до 30 м. Параллельно производился отбор выпадающих на поверхности массива атмосферных осадков. В течение срока наблюдений вариация состава атмосферных осадков имела довольно широкие пределы ( $\delta^{18}\text{O} = -5,6..-14,0 \text{ ‰}$ ). При этом все пробы эпикарстовых вод из точек, где в течение всего срока наблюдения происходил постоянный капёж, показали довольно узкий диапазон значений изотопного состава ( $\delta^{18}\text{O} = -9,6..-11,9 \text{ ‰}$ ) (рис. 2.13). Запаздывание изотопного сигнала от атмосферных осадков, который, в целом, прослеживается слабо, составило около 3 месяцев. В то же время точки наблюдений, в которых выходят высокопроводящие каналы и где наблюдается сток только после сильных дождей и снеготаяния, показали быструю передачу изотопного сигнала и гораздо бóльшую вариацию состава ( $\delta^{18}\text{O} = -8,7..-13,3 \text{ ‰}$ ).

Полученные результаты указывают на значительную буферизацию подземного стока уже в приповерхностной зоне карстовых массивов, где происходит выравнивание и запаздывание изотопного сигнала от приходящих на поверхность массива атмосферных осадков, а также насыщение вод ионами гидрокарбоната, кальция и магния. Это характерно даже для точек, где мощность эпикарста составляет всего около 10 м. В то же время на участках с развитыми каналами происходит резкое снижение защитной функции эпикарста, что выражается в быстром проникновении вод с поверхности массива в зону полного насыщения.

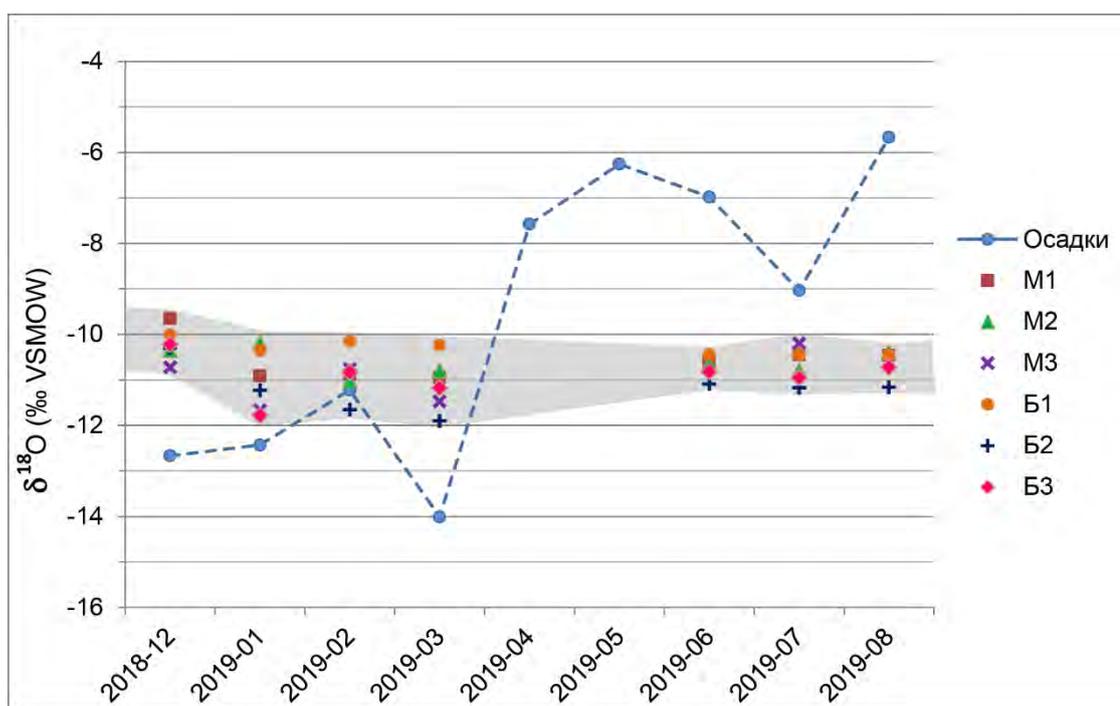


Рис. 2.13. Временные ряды содержания  $\delta^{18}\text{O}$  в атмосферных осадках (месячных суммах) и эпикарстовых водах на массиве Чатырдаг за срок с декабря 2018 г. по август 2019 г. Точки ежемесячного отбора проб эпикарстовых вод с постоянным в течение всего срока наблюдений капежом: M1, M2, M3 – в пещере Мраморной, B1, B2, B3 – в пещере Эмине-Баир-Хосар. Серым цветом показан диапазон колебаний содержания  $\delta^{18}\text{O}$  в эпикарстовых водах.

Ценные данные об условиях формирования карстовых вод дают многолетние режимные наблюдения за их гидродинамическими, физическими и гидрохимическими характеристиками. Особую ценность представляют данные высокого временного разрешения. Такие наблюдения нами ведутся в пещере Скульская, в которой вскрываются воды фреатической зоны и есть возможность ведения непрерывного мониторинга. В 2012 г. в подземном озере пещеры был установлен автономный регистратор уровня, температуры и электропроводности вод Solinst LTC Levelogger, ведущий запись указанных характеристик с временным интервалом в 30 минут, что позволяет отследить их динамику во время резких паводковых событий. В течение 2012-2014 гг. регистратором было зафиксировано 7 крупных паводков с подъемом уровня карстовых вод более чем на 10 м (рис. 2.14). Максимальные подъемы уровня происходили при наложении ливневых дождей на таяние снега в области питания КВС и достигали 32 м. Все паводки сопровождалось резкими скачками электропроводности воды, что указывает на поступление во фреатическую зону вод с повышенной минерализацией, вытесненных из эпикарстовой зоны в результате интенсивных ливней и снеготаяния. В результате этого после прохождения паводка минерализация вод фреатической зоны несколько увеличивалась по сравнению с допаводковым значением. После наиболее мощного паводка (февраль 2014 г.)

произошло резкое снижение минерализации карстовых вод, что указывает на прорыв во фреатическую зону большого объема низкоминерализованных дождевых и снеговых вод, минуя задержку в эпикарстовой зоне. Характерно, что даже во время наиболее мощных паводков температура карстовых вод в пещере оставалась стабильной (на уровне 9,6-9,8 °С), что указывает на значительную удаленность области питания и хорошую зарегулированность карстового стока данной водоносной системы.

### **2.3.2. Оперативный мониторинг режима карстовых вод**

С целью уточнения областей питания карстовых водоносных систем западной части Ай-Петринского массива, а также путей и скоростей движения карстовых вод к пещере Скельская и крупным карстовым источникам в верховьях р. Черная, нами были проведены оперативные наблюдения с высоким временным разрешением во время паводка, произошедшего здесь в начале февраля 2018 г. (рис. 2.15). Наблюдавшееся паводковое событие произошло с 2 по 8 февраля в результате потепления, приведшего к таянию накопившихся запасов снега на плато Ай-Петринского массива, на которое наложились шедшие в течение 3 дней дожди, ускорившие стаивание снега. По данным метеостанции Ай-Петри (абсолютная отметка 1160 м) в течение суток 4 февраля выпало около 50 мм дождевых осадков при температуре +3...+5 °С и произошло стаивание 20 см снега.

Наблюдения велись на 7-и объектах с разной периодичностью. Наиболее регулярно (2-4 раза в сутки) наблюдения проводились в Скельской пещере (Новое и Старое озёра), на источнике Скельском, пещере Огненный грифон, поверхностном водотоке р. Узунджи, подземных озерах Скельской пещеры (рис. 2.16, 2.17). В пещере Энтузиастов наблюдения проводились всего 2 раза, в пещере Кирилловской – 1 раз. Фиксировались уровни и расходы воды, температура, рН, удельная электропроводимость, по которой рассчитывалась общая минерализация (TDS). Температура и гидрохимические показатели измерялись при помощи портативного анализатора Sanxin SX723. Параллельно с измерениями проводился отбор проб воды на анализ содержания изотопов  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$ . Также на изотопный состав отбирались осадки в двух точках: возле пещеры Скельской (абсолютная высота 320 м) и выше по склону в районе озер Чуваш-Голь (абсолютная высота 868 м).

Выявленная динамика параметров карстовых вод показана на рис. 2.18.

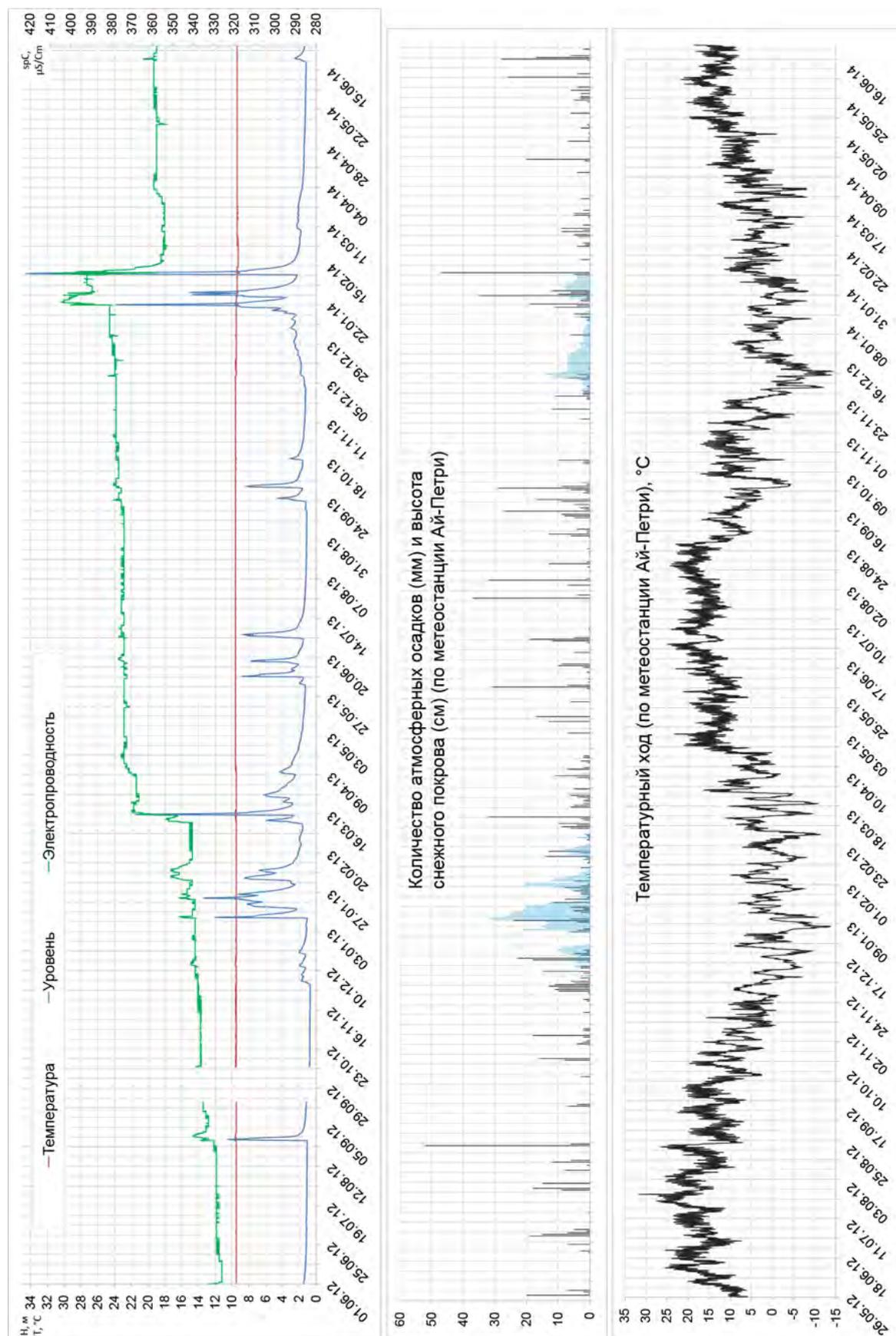


Рис. 2.14. Ряды наблюдений параметров карстовых вод в Скульской пещере (верхний блок) и основных гидрометеозлементов на Ай-Петринской яйле за 2012-2014 гг.



Рис. 2.15. Паводок на р. Черная (4 февраля 2018 г.).

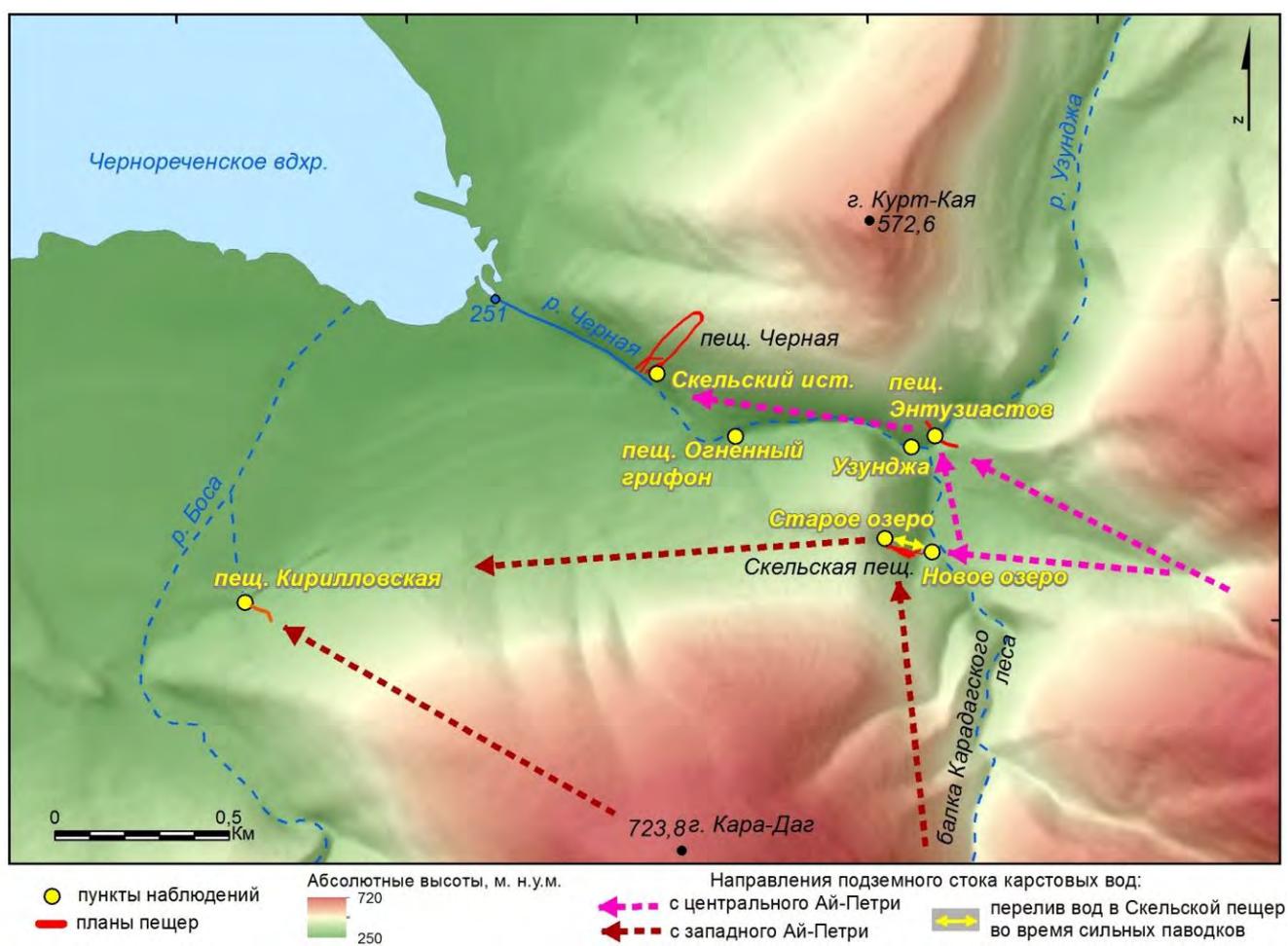


Рис. 2.16. Ситуационный план мониторинга карстовых вод во время паводка в феврале 2018 г. и предполагаемые направления подземного карстового стока в районе пещеры Скельской.

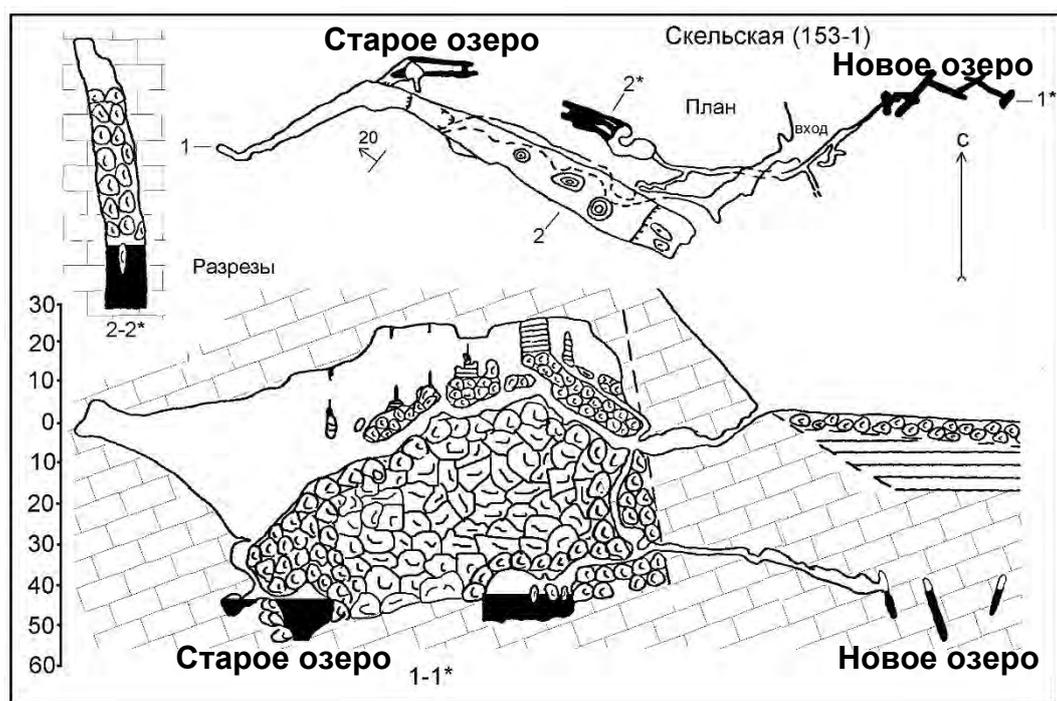


Рис. 2.17. План и разрезы Скельской пещеры (Дублянский и др., 1987) с подписями автора.

В пещере Скельская со 2 по 4 февраля произошел подъем уровня вод на 28 м, наиболее резкий этап которого пришелся на 4 февраля (подъем на 22 м в течение суток). В обеих точках (Старое и Новое озера) по визуальным наблюдениям подъем происходил примерно синхронно. С подъемом уровня происходило изменение показателя общей минерализации вод (TDS). Перед наиболее резким подъемом уровня вод в Старом озере отмечено уменьшение TDS с 260 до 220 мг/дм<sup>3</sup>, а на пике подъема – резкое повышение до 300 мг/дм<sup>3</sup>. На спаде паводка происходило плавное уменьшение TDS до до-паводкового уровня (рис. 2.18, нижняя панель). Такая динамика может отражать приход вод из разных частей области питания водоносной системы и соотношение разных типов питающих вод (инфильтрационных и инфлюационных). На Новом озере амплитуда колебаний TDS была менее значительной, что наводит на мысль о различных условиях поступления вод к наблюдаемым точкам. Также было отмечено значительное различие в температурах воды между точками наблюдения (рис. 2.18, средняя панель), которое достигало 0,8 °С, что также указывает на пространственно-временные различия компонентов питания этих частей пещеры.

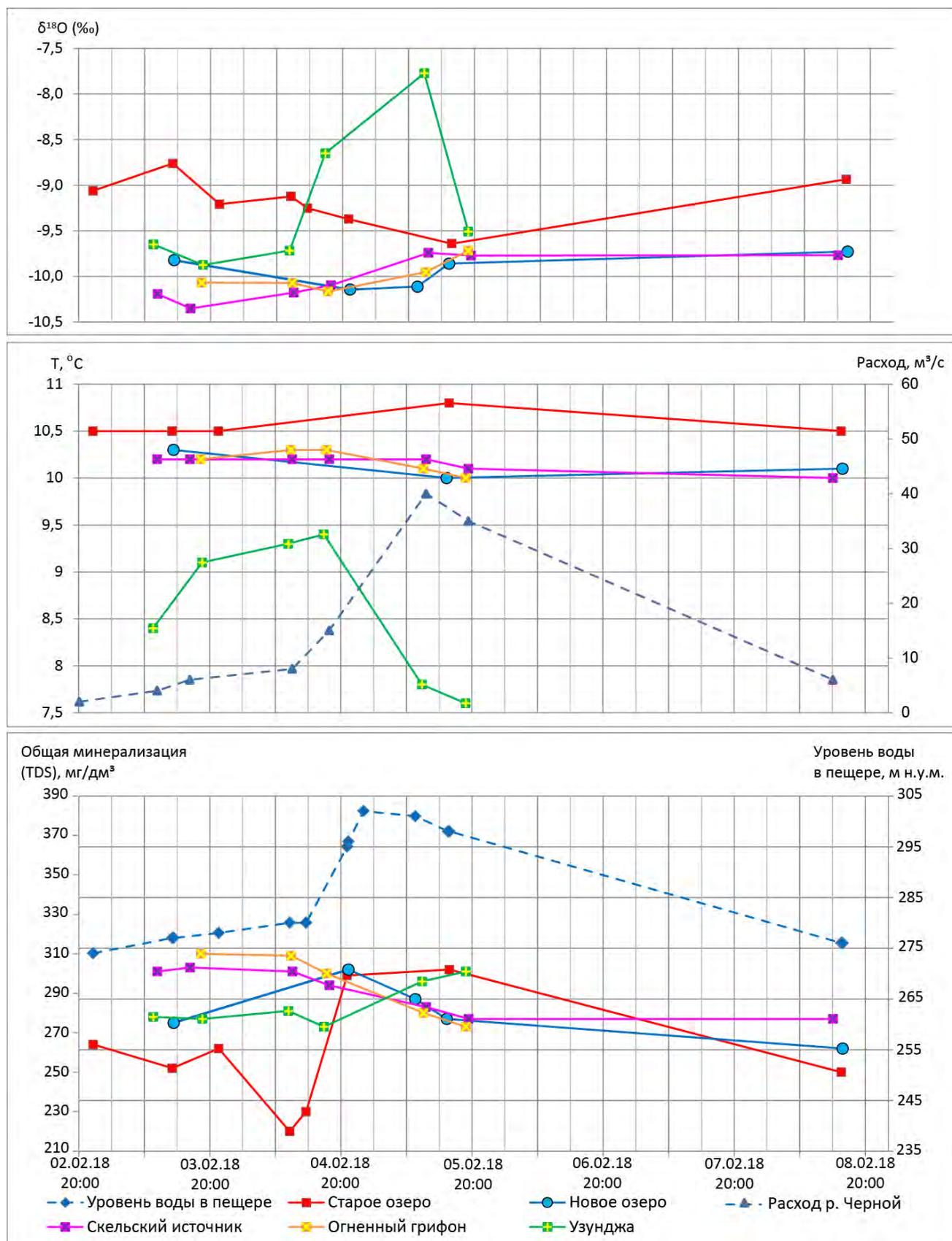


Рис. 2.18. Динамика параметров карстовых вод (уровни, температура, общая минерализация, содержание  $\delta^{18}\text{O}$ ) в пещере Скельской и на источниках р. Черной во время паводка в феврале 2018 г.

Паводок на источниках р. Черной произошел практически синхронно с подъемом уровня вод в пещере, что, на первый взгляд, указывает на гидравлическое единство этих объектов. Однако динамика общей минерализации воды и температуры на источниках Скельском и Огненном грифоне, очень близкая между ними, резко отличается от таковой в Старом озере Скельской пещеры. Во время паводка произошло резкое уменьшение TDS на обоих источниках с 310 до 275 мг/дм<sup>3</sup> и стабилизация этого показателя в после-паводковый период на последнем значении. Температуры воды на источниках изменялась мало: во время паводка произошло снижение температуры с 10,2 °С до 10 °С. Измерение параметров воды в водотоке пещеры Энтузиастов в обоих случаях дали практически идентичные значения. Это означает, что эти три объекта, скорее всего, относятся к одной водоносной системе с фокусом разгрузки в Скельском источнике.

Такая динамика, казалось бы, подтверждает ранее высказывавшееся мнение об отсутствии прямой гидравлической связи между Скельской пещерой и источниками и разных областях их питания. Однако характерно, что параметры воды (особенно температура) в Новом озере Скельской пещеры имели очень близкие значения с последними на протяжении всего периода наблюдений. Это позволяет выдвинуть гипотезу, что поступление карстовых вод к Скельскому источнику происходит транзитом через восточную часть Скельской пещеры, а озера в восточной части этой же пещеры относятся к другой водоносной системе.

Подтвердить выдвинутую гипотезу могут данные об изотопном составе вод наблюдаемых объектов. Всего на изотопный состав было проанализировано 58 проб воды, отобранных во время описываемого события. Измерения изотопного состава воды выполнялось в РЦ РДМИ Научного парка СПбГУ по методике, описанной в пункте 2.3.1. Оказалось, что отобранная дождевая вода, выпавшая перед наступлением паводка и спровоцировавшая его, имела довольно высокие значения  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$ , как для февраля. Для нижней точки отбора (пещера Скельская) оно составило  $\delta^{18}\text{O} = -2,9 \text{ ‰}$  и  $\delta^2\text{H} = -7 \text{ ‰}$ , для верхней точки (Чуваш-Голь)  $\delta^{18}\text{O} = -3,4 \text{ ‰}$  и  $\delta^2\text{H} = -10 \text{ ‰}$ . Для сравнения, средневзвешенный многолетний изотопный состав осадков в Горном Крыму (по станции на массиве Чатыр-Даг) имеет значения  $\delta^{18}\text{O} = -9,2 \text{ ‰}$  и  $\delta^2\text{H} = -62 \text{ ‰}$  (Dublyansky et al., 2018), а состав карстовых источников района Скельской пещеры находится в пределах  $\delta^{18}\text{O} = -9,6..-10,3 \text{ ‰}$  и  $\delta^2\text{H} = -65..-72 \text{ ‰}$  (Dublyansky et al., 2019). В случае быстрого продвижения этих осадков к выходам карстовых вод должно было произойти существенное (возможно, кратковременное) изменение их изотопного состава.

На протяжении срока наблюдения изотопный состав карстовых вод на наблюдаемых объектах действительно имел некоторую динамику, однако не столь существенную, как могло ожидать. Новое озеро в Скельской пещере, источник Скельский, пещеры Огненный грифон и

Энтузиастов на протяжении всего паводка характеризовались очень близким изотопным составом вод (рис. 2.18, верхняя панель). Перед максимальным подъемом воды на этих объектах отмечено некоторое уменьшение содержания тяжелых изотопов, а к концу срока наблюдений – увеличение (с  $-10,2 ‰$  до  $-9,8 ‰$  по  $\delta^{18}\text{O}$ ).

Вода в Старом озере Скельской пещеры в течение паводка имела отличный изотопный состав, с гораздо большим содержанием тяжелых изотопов: в начале паводка  $\delta^{18}\text{O} = -8,8.. -9,1 ‰$ , в конце  $\delta^{18}\text{O} = -8,9 ‰$ . В пик паводка содержание тяжелых изотопов в Старом озере уменьшилось и приблизилось к таковому у Нового озера и источников Скельского и Огненного грифона. Характерно, что значения общей минерализации вод этих объектов во время пика паводка также имели сближение.

Разовое наблюдение паводкового выхода карстовых вод из пещеры Кирилловской, проведенное 5 февраля около полудня, дали значение температуры  $10,9 \text{ }^\circ\text{C}$  и изотопный состав  $\delta^{18}\text{O} = -8,7 ‰$  и  $\delta^2\text{H} = -54 ‰$ , что ближе всего к воде из Старого озера Скельской пещеры. Однако общая минерализация воды из пещеры Кирилловской оказалась значительно выше –  $342 \text{ мг/дм}^3$ .

Таким образом, по итогам проведенного мониторинга можно сделать следующие выводы.

Во время наблюдаемого паводка карстовые воды в противоположных частях Скельской пещеры демонстрируют существенные различия в гидрофизических (температура) и изотопно-гидрохимических (общая минерализация, содержание тяжелых изотопов) показателях. Это указывает на то, что Скельская пещера соединяет две карстовые водоносные системы (КВС) с разными условиями питания. Озеро в западной части пещеры (Старое озеро) имеют существенно более высокие температуру и содержание тяжелых изотопов, чем озеро в восточной части (Новое озеро). Скорее всего, это обусловлено различными высотными отметками областей питания названных КВС. Область питания КВС Старого озера, очевидно, находится в пределах Западно-Айпетринского карстового подрайона с максимальными высотными отметками  $900-1000 \text{ м}$ , а область питания КВС Нового озера (к которой, очевидно, также относится и Скельский источник) – на центральном карстовом плато Ай-Петри с отметками выше  $1050 \text{ м}$ . Новое озеро Скельской пещеры и подземный водоток пещера Энтузиастов выполняют функцию транзитных звеньев на Центрально-Айпетринской КВС на пути к фокусу разгрузки в Скельском источнике (фиолетовые стрелки на рис. 2.16). При большом подъеме воды происходит изливание вод этой КВС также и из пещеры Огненный грифон. Пещера Кирилловская относится к КВС, также расположенной в пределах Западно-Айпетринского карстового подрайона. Это может быть та же КВС, к которой относится и Старое озеро Скельской пещеры, а может быть и другая, смежная КВС со схожей областью питания (красные стрелки на рис. 2.16 показывают движение вод к пещере Кирилловской).

Однако, вариант разгрузки карстовых вод из Старого озера через пещеру Кирилловскую на данный момент лучше всего соответствует наблюдаемой довольно быстрой сработке паводкового уровня воды в пещерном озере. Другие возможные варианты разгрузки вод Старого озера пока неизвестны. При одновременном подъеме воды в противоположных частях Скельской пещеры до 15 м и выше происходит слияние двух КВС и параметры их вод в течение короткого времени (до сработки паводка) могут иметь близкие значения.

До настоящего времени у крымских карстологов и гидрогеологов существовало устойчивое убеждение о принадлежности Скельской пещеры к единой водоносной системе, что отражалось в планировании и интерпретации индикаторных экспериментов и мониторинговых наблюдений за карстовыми водами района, воднобалансовых расчетах, гидрогеологическом районировании (Дублянский, 1977, Дублянский, Кикнадзе, 1984, Амеличев, 2008). Полученные сведения позволяют пересмотреть и уточнить представления о гидрогеологических условиях рассматриваемого района, что позволит в дальнейшем более эффективно осуществлять исследование, использование и охрану карстовых вод региональной водоносной системы Ай-Петринского массива.

### **2.3.3. Георадарное профилирование эпикарстовой зоны**

В последнее время для исследования строения эпикарста получил применение метод георадарного профилирования (Al-fares и др., 2002; Plan и др., 2007; Tallini и др., 2006). Этот метод также использовался нами с целью изучения эпикарстовой зоны массивов Горного Крыма. Принцип действия георадара основан на излучении сверхширокополосных электромагнитных импульсов в подстилающую среду и регистрации их отражения от границ раздела слоев и объектов, имеющих различные электрофизические свойства. Измерения проводились в октябре 2011 г. прибором GSSI SIR-3000 с низкочастотной антенной (100 МГц) в непрерывном режиме следования с расстоянием между точками фиксации данных в 10 и 20 м. При установленном временном интервале замеров в 500 нс. глубина зондирования составляла около 30 м.

Профилирование производилось на выбранных ключевых участках на Ай-Петринском и Чатырдагском массивах (рис. 2.19). На массиве Чатырдаг произведена съемка по четырем профилям:

- вдоль и поперек балки с эпикарстовым источником Курт-Аир – вкрест и вдоль простирания пластов известняков (1-2 и 1'-2' на рис. 2.19, А, соответственно);
- через седловину между воронками поперек Центрально-пещерной долины (1-2 на рис. 2.19, Б) и через типичную карстовую воронку (2-3 на рис. 2.19, Б) – вкрест простирания известняков.

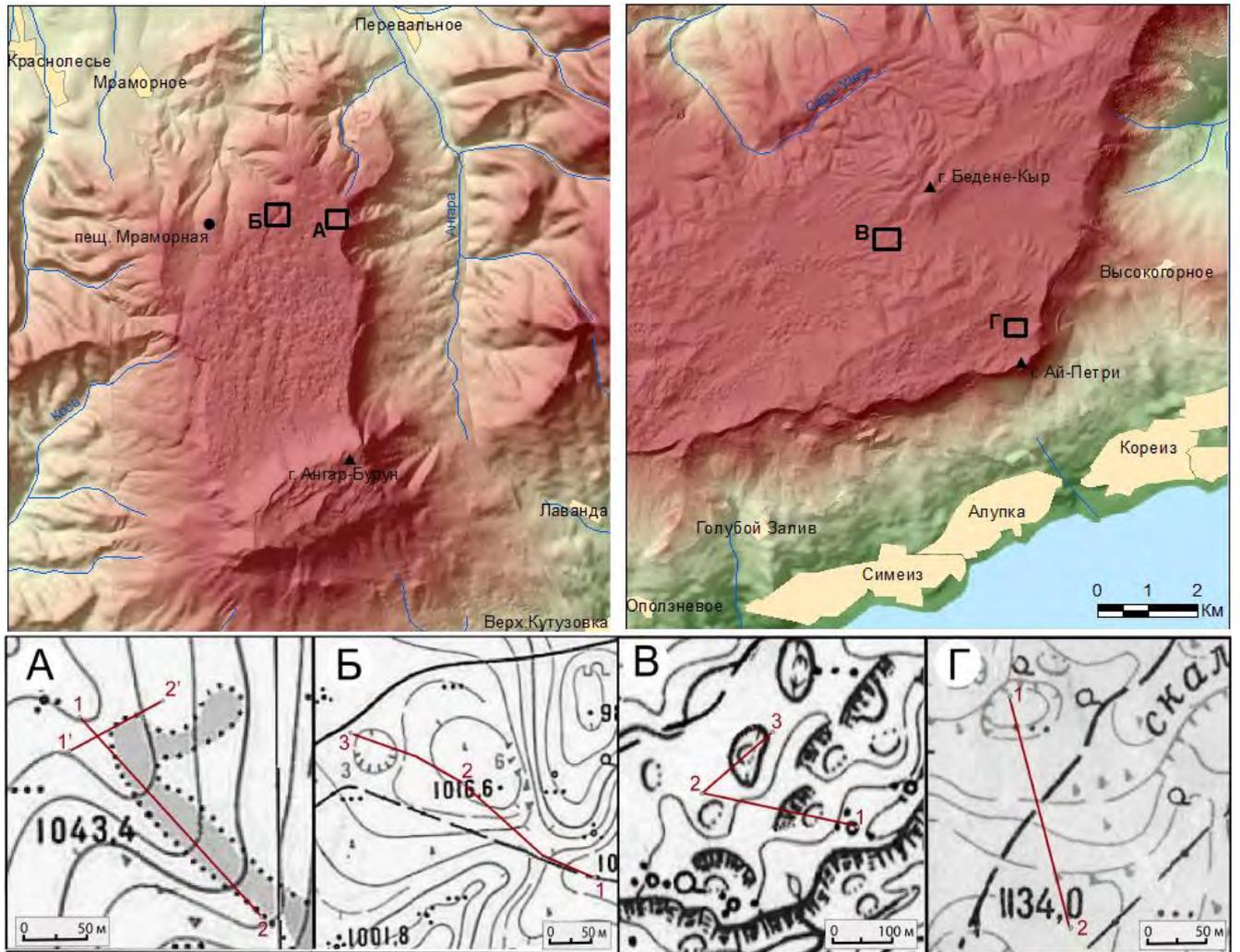


Рис. 2.19. Расположение участков георадарного профилирования и линий профилей на массиве Чатырдаг (А, Б) и Ай-Петри (В, Г).

На Ай-Петри произведено пять профилей на двух участках плато:

- участок у юго-западного основания горы Бедене-Кыр: два профиля через типичные воронки и водоразделы – вкрест и вдоль простирания пластов известняков (рис. 2.19, секция В, рис. 2.20), один профиль на южном склоне г. Бедене-Кыр вкрест простирания пластов;
- участок в Приайпетринской котловине: профиль от воронки с пещерой Трехглазка через водораздел вкрест простирания пластов (рис. 2.19, секция Г) и профиль над пещерой Геофизической вкрест простирания пластов.

Таким образом, были отсняты участки с наиболее репрезентативными элементами рельефа открытого карста, что дает возможность последующей экстраполяции полученных результатов на территории с подобной морфологией.

Таким образом, были отсняты участки с наиболее репрезентативными элементами рельефа открытого карста, что позволяет выяснить различия структуры и мощности эпикарстовой зоны в зависимости от геоморфологических условий. Краткие итоги этих работ

по георадарному профилированию с целью изучения эпикарста в Горном Крыму опубликованы нами в работе (Климчук и др., 2012).

Результаты георадарного профилирования были обработаны с проведением нижней границы эпикарстовой зоны. Данная граница проводилась в месте резкого уменьшения контрастности электрофизических свойств толщи пород, где происходит переход от разуплотненной зоны эпикарста к нижележащей условно монолитной зоне массива (рис. 2.21).



Рис. 2.20. Георадарное профилирование через карстовую воронку на плато массива Ай-Петри.

Результаты георадарной съемки выразительно характеризуют эпикарстовую зону и ее строение (рис. 2.22). Эпикарстовая зона имеет изменчивую мощность от 10 до 18 м, с наиболее разуплотненной подзоной мощностью до 5-7 м. Ввиду дождливой погоды в период до и во время проведения работ контрастно выражена водонасыщенная подзона эпикарста, особенно на профиле вдоль балки с источником Курт-Аир. Полученные профили отчетливо отражают особенности пластовой и тектонической структуры эпикарстовой зоны, акцентированные растворением. На одном из профилей, проходящем через карстовую воронку (рис. 2.19. Б), четко прослеживается отличие электрофизических свойств участка под днищем воронки от склоновых и водораздельных участков (рис. 2.23). Это можно объяснить наличием под днищем воронки зоны повышенной водопроницаемости, дренирующей эпикарст. В целом, полученные результаты полностью соответствуют теоретическим представлениям о закономерностях строения и функционирования эпикарстовой зоны.

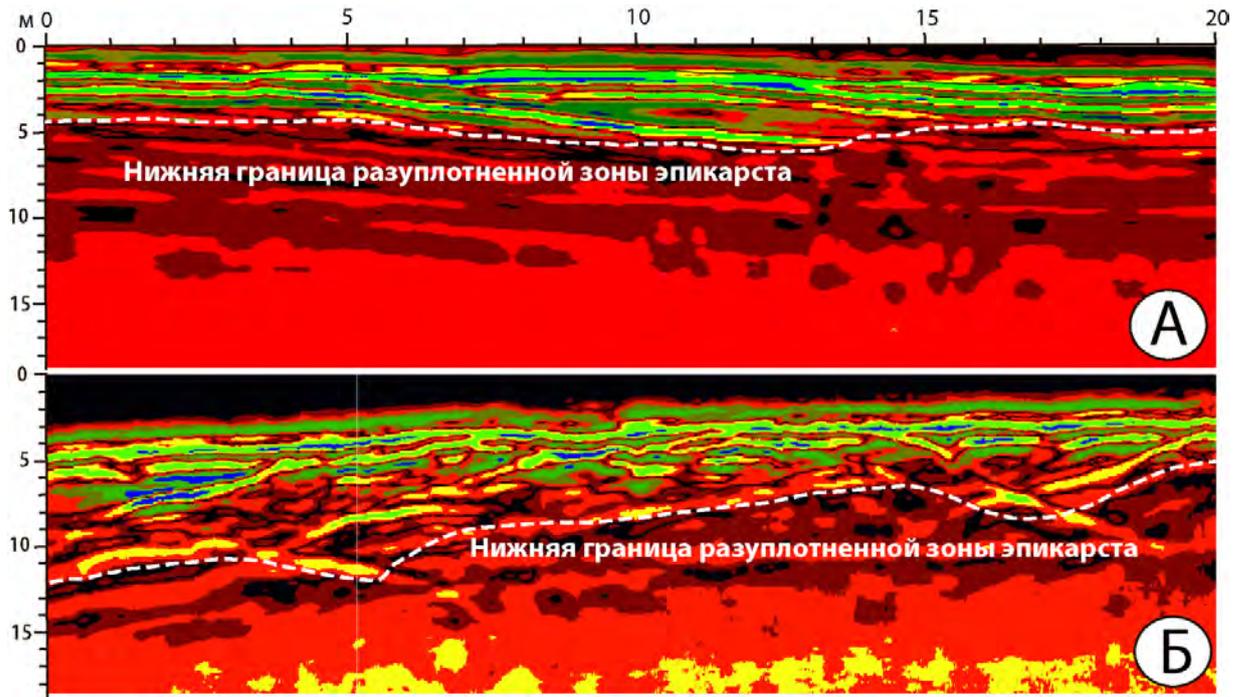


Рис. 2.21. Фрагменты георадарных профилей, полученных на массиве Ай-Петри: А – на участке В, Б – на участке Г (см. рис. 2.19).

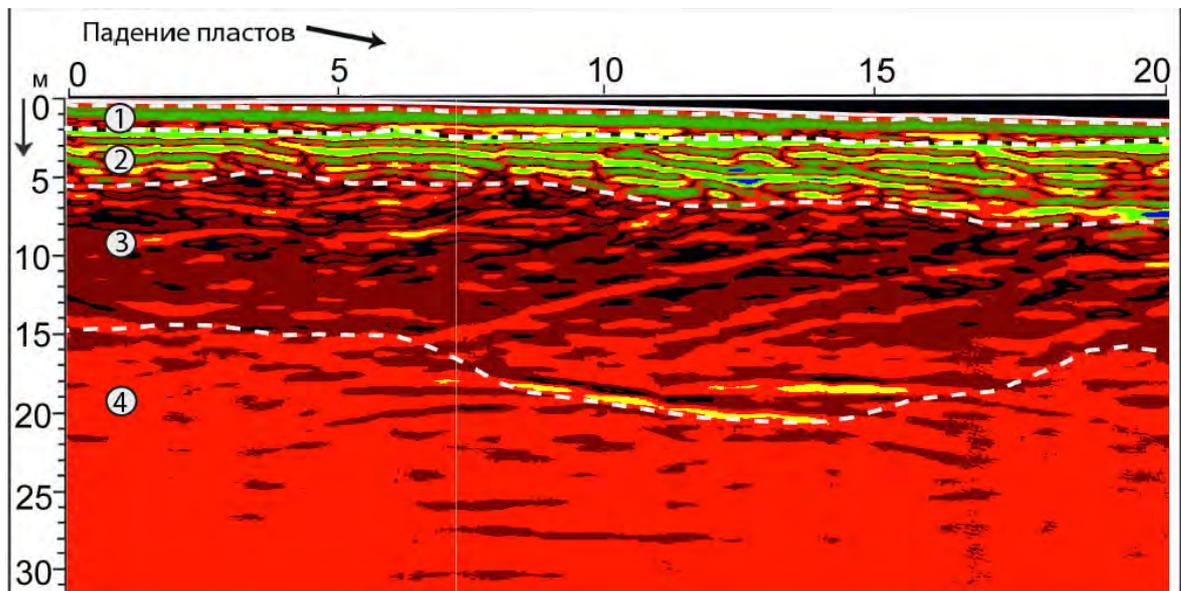


Рис. 2.22. Георадарный профиль через склон типичной карстовой воронки на массиве Чатырдаг с характерной структурой эпикарстовой зоны. Пунктиром обозначены выделяемые подзоны эпикарста: 1 – верхняя ненасыщенная; 2 – «подвешенного» водоносного горизонта; 3 – постепенного уменьшения трещиноватости и закарстованности в основании эпикарста; 4 – основная (ненарушенная) зона массива.

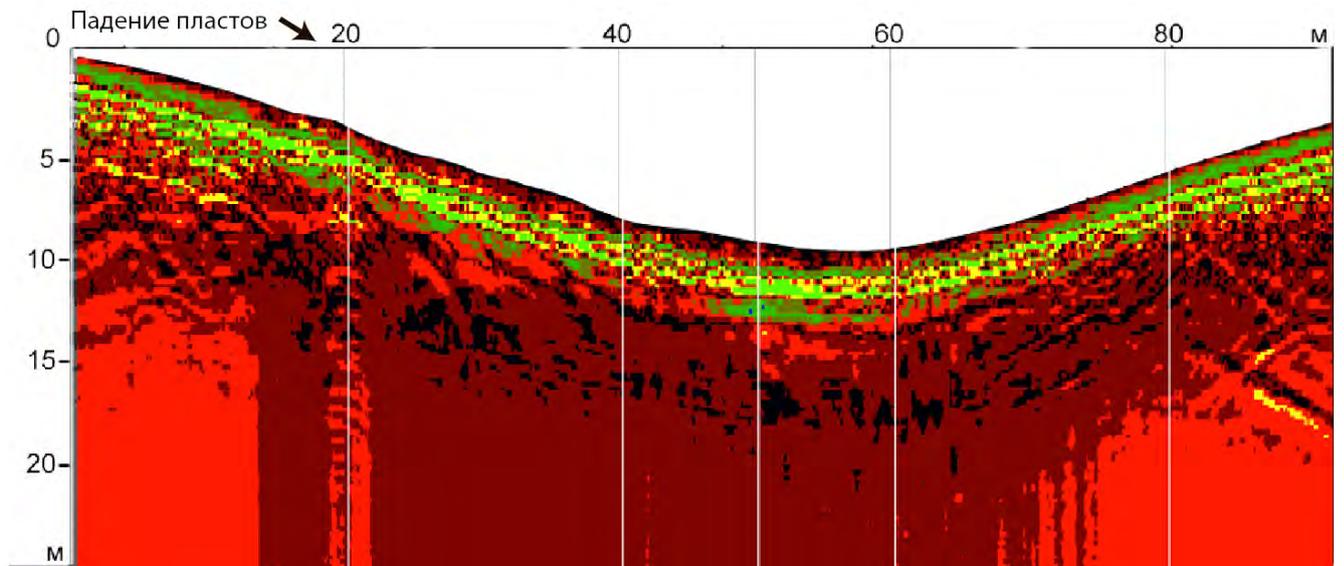


Рис. 2.23. Георадарный профиль через типичную карстовую воронку на плато массива Чатырдаг.

#### 2.3.4. Спелеологические работы

В рамках экспедиций Института спелеологии и карстологии (до 2014 г. Украинского института спелеологии и карстологии) и Крымского горно-спелеологического клуба, а также многочисленных индивидуальных полевых выездов, нами с 2008 г. в Горном Крыму было пройдено, задокументировано и отснято около 30 неизвестных ранее карстовых полостей. Большинство из них являются гидрологически активными. Крупнейшими стали пещеры источники Мамут-Чокрак (Байдарский массив) протяженностью 5453 м и Байдар-Чокрак (Ай-Петринский массив) протяженностью 1235 м, карстовая шахта Миледи (Карабийский массив) глубиной 401 м и протяженностью 1177 м, пещера-понор Восточный поток (Долгоруковский массив) протяженностью около 2 км.

Топографическая съемка производилась с использованием компасов и угломеров Suunto (точность  $0,5^\circ$ ) и лазерного дистометра Leica Disto X310 (точность измерения расстояний 0,01 м). Обработка полевых измерений производилась в программе Walls, где строилась основа для планов и разрезов. Обрисовка, оформление и компоновка топоматериалов выполнялась в программе Adobe Illustrator. Пример оформленных материалов съемки карстовой полости показан на рис. 2.24.

Кроме морфологии и метрики полостей документировались пещерные отложения (гравитационные, водно-механические, водно-хемогенные, биогенные), водопроявления, литология вмещающих пород, трещиноватость, проявления тектонических движений (зеркала скольжения, тектонические брекчии, зоны милонитизации). При наличии водопроявлений проводилось измерение температуры и электропроводности вод, отбирались пробы на

изотопный состав. Полученные материалы (описаний, карты и фото полостей) вносились в базы данных Кадастра карстовых полостей Крыма, Информационно-поисковой системы «Пещеры России», ГИС «Карст Крыма».

Кроме документирования новооткрытых пещер также проводились наблюдения в известных карстовых полостях, включая фиксацию элементов залегания полостей, инвентаризацию и опробования водопроявлений на изотопно-гидрохимические показатели. Полученные данные существенно расширяют и дополняют представления о подземном закарстовании и гидрогеологических условиях как отдельных массивов, так и всей Горно-Крымской карстовой области в целом.

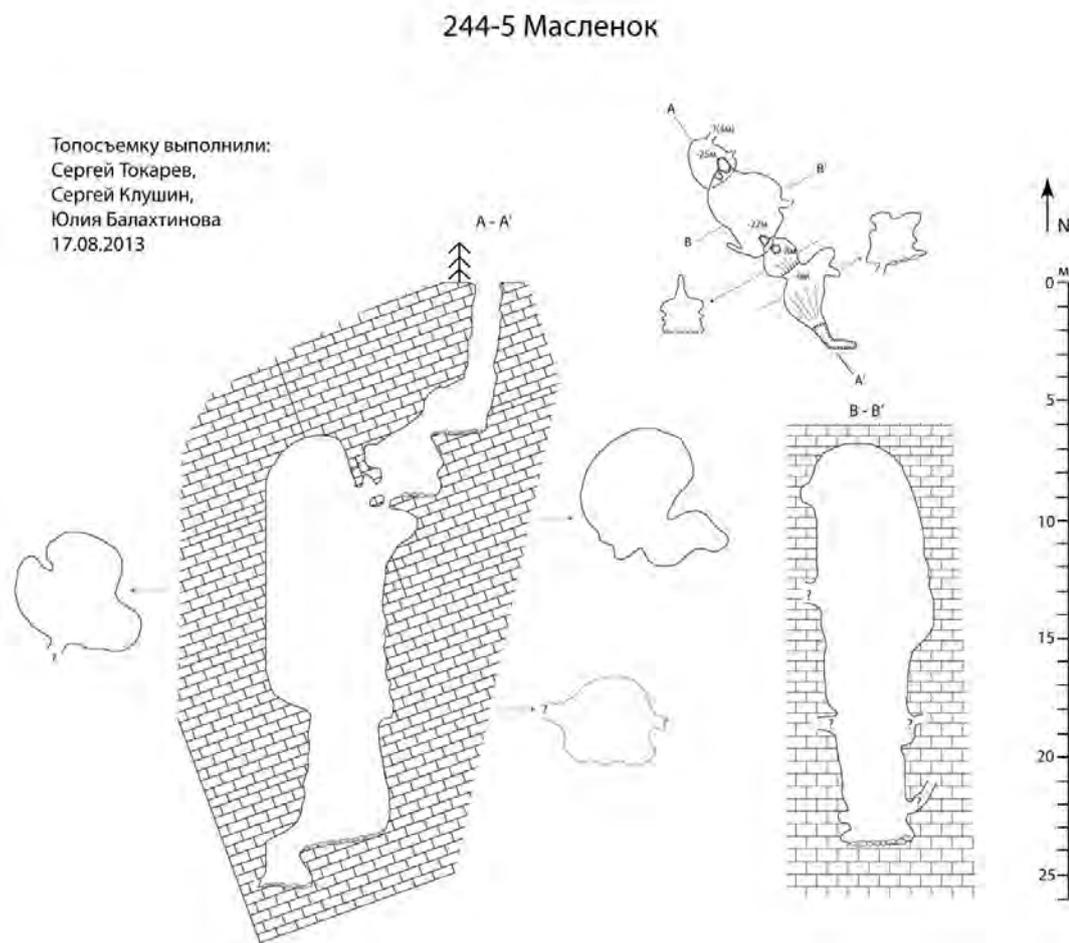


Рис. 2.24. План и разрезы вертикальной карстовой пещеры-понора Маслѐнок (Ялтинский массив), обнаруженной в 2013 г.

### 2.3.5. Индикаторные эксперименты

Индикаторные эксперименты признаны в международной практике как наиболее надежный и эффективный метод изучения структуры подземного стока карстовых массивов и определения направлений и скоростей движения карстовых вод (Дублянский, Маматкулов,

1983; Ford, Williams, 2007; Климчук, 2008). Также индикаторные методы успешно применяются при выяснении характера распространения загрязнений в КВС (скорость добегания к выходам вод, изменение концентрации с течением времени), поскольку наиболее часто используемые трассеры являются органическими соединениями, хорошо растворимыми в воде (флуоресцентные красители) и имитирующими тем самым загрязнители.

В Горном Крыму в 60-80 гг. прошлого столетия различными научными и производственными организациями проведено 33 индикаторных эксперимента (Дублянский, Кикнадзе, 1984). В 2015-2019 гг. в карстовой провинции Горного Крыма нами было выполнено 5 экспериментов по трассированию карстовых подземных вод. Четыре из них проводились в предгорной части бассейна р. Салгир, в верховье ее притоков: ручьев Чумакарка, Абдалка (рис. 2.25), Чокурча и Петровской балки. Они дали ценную информацию о локальных особенностях подземного карстового стока. Наиболее масштабный и длительный эксперимент был выполнен в 2019 г. на Долгоруковском массиве Главной гряды Крымских гор. Поскольку он является наиболее значимым в контексте данной работы, ниже приводится его подробное описание.



Рис. 2.25. Понор в верхнем течении р. Абдалка (слева) и окрашивание поглощаемых им вод флуоресцеином (справа).

До 2019 г. было известно о проведении на Долгоруковском массиве 9-и индикаторных экспериментов (Дублянский, Кикнадзе, 1984). По их итогам удалось выяснить примерные границы областей питания лишь для источников его западного склона. Контуры водосборов крупных источников, расположенных на восточном и северном склоне массива, по итогам тех экспериментов остались невыясненными.

Спелеологические исследования последних десятилетий выявили несколько значительных карстовых пещер, относящихся к водоносным системам восточной части Долгоруковского массива (Самохин, 2010). Среди них наиболее протяженной является пещера Восточный поток с разведанной длиной более 2 км. Пещера имеет конфигурацию близкую к линейной с генеральным направлением на север-северо-восток. На расстоянии около 500 м от входа в пещере формируется постоянный водоток с расходом 0,1-1 л/сек в меженный период. Расход водотока постепенно увеличивается при движении к дальней части пещеры, где наблюдается переход от вадозных условий к условиям сифонной циркуляции. По направлению потока в прирусловой части западного склона балки р. Бурульча имеются два постоянных выхода подземных вод: источники Крестовый (Балык-Голь) и Кара-Коба с межнным расходом более 10 л/сек каждый. Ранее предполагалось, что источники Крестовая и Кара-Коба связаны между собой и вместе являются нижним звеном (фокусом разгрузки) системы Восточного потока. На это указывало направление ходов Восточного потока, близость расположения источников и близкие значения температурных и гидрохимических показателей их вод.

Схема выполненного нами в 2019 г. эксперимента представлена на рис. 2.26. В ходе описываемого эксперимента в качестве трассера использовалась натриевая соль флуоресцеина (уранин). 200 г красителя, растворенного в воде объемом 2 л с добавлением щелочи, было запущено в водоток пещеры Восточный поток в 600 м от ее входа. Моменту запуска, состоявшегося 25-го мая, предшествовал длительный засушливый период и, в связи с этим, уровень карстовых вод в это время был близок к межнному. Расход водотока в месте ввода красителя составлял всего около 0,1 л/сек.

Отслеживание выхода красителя проводилось на 11 точках методом ловушек (для качественного определения) и отбором проб воды (количественное определение) с последующим анализом в лаборатории, а также визуально на месте. Частота отбора проб и смены ловушек на основных точках (Крестовый, Кара-Коба) в течение первой недели после запуска составляла каждые 1-2 суток, в течение первых двух суток – 4-8 раз в сутки. В дальнейшем, как и на всех остальных точках, она составляла каждые 1-2 недели. Последние пробы и ловушки были отобраны 12 августа. На протяжении всего срока эксперимента наблюдались довольно засушливые погодные условия с кратковременными дождями средней интенсивности, в связи с чем, значительных подъемов уровня карстовых вод не происходило.

В качестве сорбента для ловушек на краситель использовался активированный уголь на кокосовой основе марки АНРW с размерностью фракций 6x12. В лабораторных условиях производилась подготовка ловушек (промывка дистиллированной водой и сушка в печи) и элюирование красителя из сорбента. Полученный из ловушек элюент и пробы воды анализировались на наличие флуоресцеина на спектрофлуориметре Horiba Fluoromax 4.

Пробоподготовка и анализ проводились в лабораториях кафедры общей и физической химии КФУ им. В.И. Вернадского по методике (Aley, 2002).

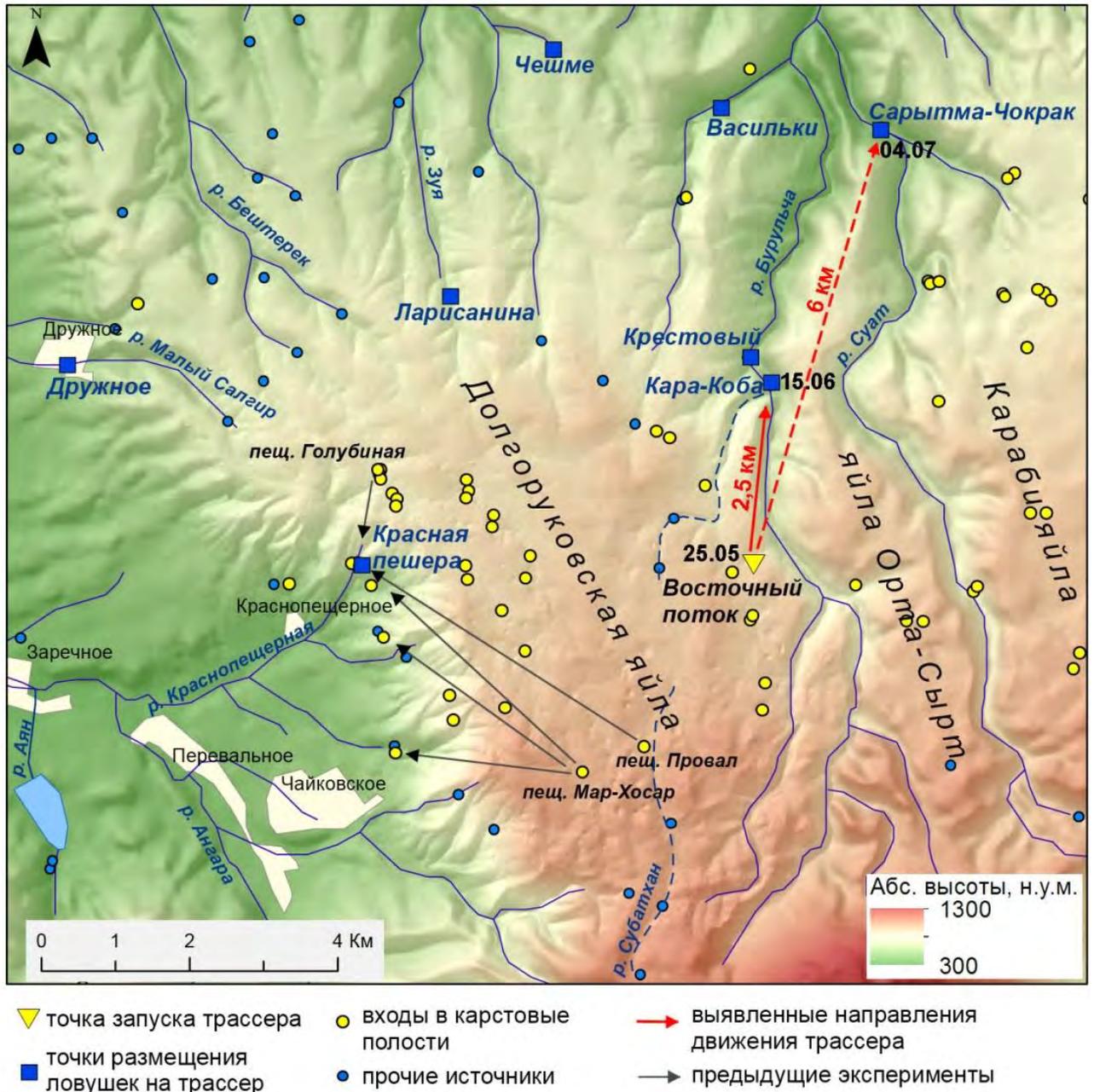


Рис. 2.26. Схема индикаторного эксперимента 2019 г. на Долгоруковском массиве.

По итогам проведения эксперимента выход красителя был достоверно установлен в источнике Кара-Коба. Впервые он был обнаружен в пробе воды, отобранной 15 июня. Следующая проба воды, отобранная 26 июня, также имела характерную флуоресценцию с еще большей интенсивностью. Последующие пробы воды, начиная с 4 июля, уже не давали позитивных результатов. Очевидно, в это время концентрация красителя упала ниже детектируемого порога. Выход красителя подтверждается и результатами анализа ловушек.

Флуоресцеин был обнаружен в трех ловушках подряд, охватывающих период с 15 июня по 25 июля. Максимальную интенсивность флуоресценции дал сорбент из ловушки за 15-26 июня.

Слабая флуоресценция была обнаружена также в двух подряд пробах воды с источника Сарытма-Чокрак (от 4 и 25 июля), расположенного в балке р. Суат. К сожалению, ловушка, которая должна была подтвердить выход красителя в течение этого интервала, исчезла с места установки. Однако, факт выхода красителя в этой точке в течение указанного временного промежутка не вызывает каких-либо противоречий с другими результатами эксперимента и имеющимися данными о гидрогеологии района, и, поэтому, также может считаться достаточно достоверным.

Следует отметить, что, в связи с низкой концентрацией красителя на выходе, его присутствие визуальными наблюдениями на месте замечено не было. Все позитивные результаты получены с помощью анализа на спектрофлуориметре.

Таким образом, была установлена прямая связь водотока пещеры Восточный поток с источником Кара-Коба, расположенным в 2,5 км к север-северо-востоку от точки запуска красителя. Очевидно, Восточная котловина Долгоруковской яйлы относится к области питания указанного источника. Также установлено, что источники Крестовый и Кара-Коба не имеют гидрологического взаимодействия между собой, по крайней мере, в условиях низкой водности. На это также косвенно указывают результаты термометрических и кондуктометрических наблюдений, проводимых в срок эксперимента.

Изучение геолого-структурных данных района (по Дублянскому и др., 2002) показало, что источник Крестовый, скорее всего, приурочен к Краснопещерному сбросу восток-северо-восточного простирания. Очевидно, что пещера Восточный поток и связанный с ней источник Кара-Коба заложены вдоль другого тектонического нарушения, имеющего север-северо-восточное направление, к которому, предположительно, также приурочен и источник Сарытма-Чокрак. В этом случае выход красителя в последнем источнике выглядит вполне закономерным.

Кроме прояснения структуры карстового стока восточной части Долгоруковского массива, важным результатом эксперимента является получение информации о скорости движения и транспортной функции карстовых вод в условиях низкой водности. Предшествующие индикаторные эксперименты в Горном Крыму проводились, как правило, в условиях высокой водности карстовых вод, зачастую, в момент паводков. По их результатам средняя скорость продвижения трассера с карстовыми водами составила более 3350 м/сут (Дублянский, Кикнадзе, 1984). По результатам выполненного нами эксперимента была получена скорость 156 м/сут (до источника Кара-Коба) и 190 м/сут (до источника Сарытма-Чокрак), вычисленная с учетом коэффициента извилистости карстовых полостей «1,3»,

предложенного В.Н. Дублянским (1977). Таким образом, транспортировка растворенных в подземных водах веществ (в том числе и загрязнителей) в условиях низкой водности карстовых систем происходит со значительно меньшей скоростью (в нашем случае, в 20 раз), чем в условиях высокой водности.

#### **2.4. Антропогенная трансформация и загрязнение**

Горный Крым из всех физико-географических областей полуострова отличается наименьшей антропогенной преобразованностью. Это обусловлено, во-первых, относительной труднодоступностью и сложностью природных условий области и, во вторых, высокой долей территорий с заповедным статусом. В Горном Крыму расположена основная масса ООПТ полуострова, в том числе и крупнейшие заповедники: Крымский природный (с недавнего времени получил статус национального парка), Ялтинский горно-лесной, Карадагский. Столь значительная степень заповедности ландшафтов области говорит о ее высоком природно-ресурсном потенциале, прежде всего, для туристско-рекреационной отрасли. Это неизбежно влечет за собой активное использование ее природных ресурсов, что зачастую вызывает экологические проблемы.

В истории природопользования Горного Крыма наибольший отпечаток на местные природные комплексы оставило скотоводство. До середины XX в. на протяжении нескольких столетий платообразные вершинные поверхности Крымских гор с лугово-степной растительностью интенсивно использовались как летние пастбища для мелкого рогатого скота. Само историческое название ландшафта «яйла» с крымско-татарского языка буквально означает «летнее пастбище». Имеются сведения о том, что в XIX в. на крымские яйлы пригоняли овец, в том числе и из областей, расположенных за пределами полуострова (Шутов, 1979). Чрезмерный выпас скота приводил к уничтожению растительности, активизации процессов эрозии и дефляции почв, и, в целом, к деградации природных комплексов яйлинских ландшафтов. Некоторые исследователи рассматривают эту деятельность в качестве одной из причин современного безлесия горно-яйлинских ландшафтов (Ведь, 2007, Олиферов, 2011). Кроме этого, образуемые в результате выпаса на карстовых плато отходы животноводства приводили к бактериальному и нитратному загрязнению подземных вод. Работы УкрГИМР в Горном Крыму выявили четкий годовой ход бактериального загрязнения воды в основных карстовых источниках, связанный с выпасом скота на яйлах (Дублянский, Дублянская, 1996). Особенно высокие уровни загрязнения фиксировались в летне-осенний период после прохождения сильных ливней и вызываемых ими паводков карстовых вод. Несмотря на введение в 1961 г. официального запрета на выпас скота на яйлах, его полного прекращения в последствие так и не наступило. В литературе конца прошлого столетия еще отмечалась

микробиологическая загрязненность карстовых вод отдельных массивов. Например, бактериальный состав подземных вод Долгоруковского массива, подверженного интенсивному техногенному воздействию (прокладка дорог, снятие и перемещение почвенного покрова, выпас скота и пр.), был относительно благоприятен только во время сработки запасов, накопленных после осенне-зимних паводков. В остальные периоды вода требовала предварительной обработки (Дублянский и др., 1990). Такая ситуация сохраняется и в наши дни: в ведомственных лабораторных отчетах по анализу качества воды, хоть и довольно редко, но всё же фиксируются случаи повышенных значений общего микробного числа.

Из мелиоративных мероприятий, направленных на улучшение условий формирования водных ресурсов ГК, на крымских яйлах в XX в. активно велась лесохозяйственная деятельность. Лесопосадки проводились с 1909 по 1990 г. Основные культуры: сосна крымская и обыкновенная, береза. Всего искусственные зеленые насаждения на яйлах занимают 3,5 тыс. га (из 35 тыс. га всей яйлинской площади) (Багрова, Лысак, 2000). В настоящее время искусственные лесные насаждения оказывают заметное влияние на гидрометеорологический режим яйл и на условия питания карстовых вод.

Проведенные ранее оценки антропогенного воздействия на ландшафты ГК имеют слишком общий характер и отличаются крайне низкой дифференцированностью. Примером такой оценки является определение степени воздействия различных факторов на ландшафты в разных зонах Крыма (Ена и др., 2004), в том числе на ландшафты ГК. В настоящее время загрязнение КПВ ГК носит локальный (очаговый) пространственный характер, что также подтверждают результаты упомянутой оценки В.Г. Ены с соавторами. Источниками загрязнения КПВ ГК являются объекты туристско-рекреационной инфраструктуры (Ай-Петринский и Чатырдагский массивы), загоны для скота (Долгоруковский, Карабийский и Ай-Петринский массивы), военизированные части (Ай-Петринский и Карабийский массивы)

Кроме автогенных источников загрязнения, возникающих непосредственно в области питания КПВ, имеет место также и аллогенный привнос загрязнителей с атмосферными осадками. Данные мониторинга химического состава атмосферных осадков на крымских метеостанциях говорят об их значительной загрязненности (табл. 2.1). Например, содержание нитратов в отдельные события выпадения осадков достигает 10-20 мг/л, что значительно превышает их среднюю концентрацию в водах карстовых источников. Источниками загрязнения атмосферных осадков, очевидно, являются хозяйственно развитые области юга Украины и Европейской части России, поставляющие около 50 % поступающей на полуостров атмосферной влаги (Dublyansky et al., 2018).

Таблица 2.1. Показатели химического состава атмосферных осадков на станциях государственной сети наблюдений в Крыму за 2018 г. (по данным Доклада о состоянии..., 2018)

Пункт наблюдения \ Содержание, мг/л		Сульфаты	Хлориды	Нитраты	Гидрокар- бонат	Аммоний	Натрий	Калий	Кальций	Магний
Карадагская НИГО	ср.	3,61	2,63	2,23	<b>6,01</b>	0,59	1,70	0,43	2,55	0,36
	макс.	<b>7,16</b>	4,89	4,70	<b>40,93</b>	1,55	3,03	0,81	<b>12,85</b>	0,83
Никитский сад	ср.	2,95	1,94	2,66	1,06	0,12	1,03	0,40	1,38	0,16
	макс.	4,89	3,18	<b>10,71</b>	2,75	0,46	1,57	0,82	2,26	0,23
Нижегорский	ср.	<b>14,47</b>	<b>18,80</b>	4,92	<b>19,61</b>	0,50	<b>6,68</b>	<b>8,97</b>	<b>10,15</b>	1,91
	макс.	<b>97,98</b>	<b>88,84</b>	<b>19,81</b>	<b>105,19</b>	1,73	<b>39,78</b>	<b>45,43</b>	<b>59,57</b>	<b>12,45</b>

Прим.: жирным курсивом показаны значения в диапазоне 5-10 мг/л, жирным курсивом с подчеркиванием – превышающие 10 мг/л.

Намечающееся дальнейшее развитие рекреационного комплекса региона с большой вероятностью повлечет более интенсивное освоение и горных районов. В настоящее время разрабатываются проекты строительства крупных туристско-рекреационных комплексов на Чатырдаге и Ай-Петри, что является новым серьезным вызовом для охраны природных комплексов и ресурсов подземных вод ГК.

### Выводы

В результате проведенного анализа условий формирования карстовых подземных вод Горного Крыма выявлены их региональные особенности, имеющие принципиальное значение для оценки их уязвимости к загрязнению:

- цокольное строение большинства карстовых массивов Горного Крыма с наличием межгорных прогибов (соответственно безнапорные и напорные условия карстовых подземных вод);
- высокая интенсивность и, в то же время, неравномерность развития карста;
- выраженность платообразных поверхностей массивов с замкнутыми водосборами, играющими роль основной области питания карстовых водоносных систем;
- практически полное отсутствие на плато массивов покровных слабопроницаемых отложений и, как следствие, преобладание автогенного (в основном инфильтрационного) питания при практическом отсутствии аллогенного;
- мозаичность почвенного покрова, характеризующегося в основном малыми мощностями

(до 1 м).

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

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

- отсутствие (за единичными исключениями) точечной инфлюации при широком распространении линейной инфлюации (в местах пересечения русел водотоков и зон тектонической трещиноватости);

- широкое распространение очаговой инфильтрации (главным образом, в днищах карстовых воронок при таянии снега).

- сравнительно низкая антропогенная трансформация природных комплексов Горного Крыма и малое количество источников загрязнения, преимущественно локализованного характера, в пределах областей формирования карстовых вод. Наибольшую угрозу представляет бактериальное загрязнение.

### ГЛАВА 3

## ГОРНО-КРЫМСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА ОЦЕНКИ УЯЗВИМОСТИ КАРСТОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

### 3.1. Анализ применимости существующих методов оценки уязвимости карстовых подземных вод к условиям Горного Крыма

Выше был рассмотрен комплекс методов оценки УПВ в контексте их адекватной применимости к условиям карстовых водоносных систем. Их рассмотрение показало, что практически все методы оценки и картирования уязвимости в карстовых районах являются индексно-рейтинговыми. Параметрические методы, получившие широкое применение для некарстовых территорий, малоприменимы к условиям карста ввиду крайней неоднородности условий питания и характеристик фильтрационных сред и невозможности их адекватной генерализации (неприменимость допущения условно-сплошной среды, фильтрация в которой имеет плано-однородный характер). Применение в условиях карста методов оценки уязвимости на основе математического моделирования миграционных процессов затруднено по тем же причинам объективных трудностей в формализации условий и генерализации фильтрационных и миграционных параметров.

Несмотря на формирование общей методологии оценки 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. Вариации в методике допустимы даже в пределах одного региона, где есть существенные порайонные различия условий. Основой для выбора и развития методики региональной оценки УКПВ должно служить специальное районирование по условиям развития карста.

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 (табл. 3.1, 3.2). 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 правки 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.

#### **4.2. Схема оценки уязвимости карстовых подземных вод согласно Горно-Крымской региональной методике**

В качестве методической основы для разработки региональной модификации метода оценки УКПВ Горного Крыма был избран Словенский подход, который, в свою очередь, является модификацией метода COP, разработанного на основе Европейского подхода (см. подраздел 1.4). 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 новой модификации метода оценки собственной уязвимости подземных вод в условиях карста, получившего рабочее название «Горно-Крымский подход».

Основная адаптация базовых методик заключалась в следующем:

- в группу факторов «О» введена оценка защитной функции эпикарста;
- 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 (факторы «Р») кроме интенсивности жидких осадков (в теплый период) также учитывается питание за счет твердых осадков зимнего периода (по количеству интенсивных снеготаяний в течение холодного периода);
- 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.

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

Таблица 3.1. Сравнение различных методик оценки УПВ на предмет учета ими различных факторов

Методы		SINTACS	ЕPIK	PI	COP	Словенский	PaPRIKa	DRISTPI
Факторы								
Перекрываю- щие слои (защитные покровы)	Мощность почвы	+	+	+	+	+	+	+
	Механический состав почвы	+		+	+	+	+	+
	Мощность подпочвы	+	+	+	+	+	+	+
	Проницаемость подпочвы	+	+	+	+	+	+	+
	Мощность ненасыщенной зоны	+		+	+	+	+	+
	Трещиноватость			+	+	+	+	+
	Геоморфологическая выраженность эпикарста		+	+	+	+	+	+
	Гидрогеологическая функция эпикарста						+	
Условия инфильтраци и	Напорные условия			+	+	+		
	Поверхностная гидрография		+	+	+	+		+
	Уклоны местности	+	+	+	+	+	+	+
	Растительный покров		+	+	+	+		
	Точечная инфлюация			+	+	+	+	+
Условия питания	Линейная инфлюация							+
	Автогенное	+	+	+	+	+	+	+
	Аллогенное		+	+	+	+	+	+
	Количество осадков, объем питания	+		+	+	+		+
	Интенсивность осадков				+	+		
Развитость подземной карстовой сети	Распределение снега							
	Наличие карстовой сети		+			+	+	
	Гидрогеолог. характеристика источников		+			+		
	Интерпретация трассерных экспериментов		+			+	+	
	Спелеологические данные		+			+	+	
Разрывная нарушенность								
Временная изменчивость						+		
Уязвимость ресурса		+	+	+	+	+	+	+
Уязвимость на выходе			+			+	+	

Таблица 3.2. Выделенные преимущества и недостатки различных методик оценки УКПВ

Методы	SINTACS	ЕРІК	PI	COP	Словенский	PaPRIKa	DRISTPI
Преимущества	Применим ко всем типам водоносных горизонтов	Прост, удобен, не требует много данных, в качестве результата имеет выделение зон охраны	Применим ко всем типам водоносных горизонтов, содержит специальные инструменты для карстовых условий, высокая степень валидации для районов покрытого карста	Применим ко всем типам водоносных горизонтов, содержит специальные инструменты для карстовых условий, не требует большого количества детальных данных, высокая степень валидации для районов открытого карста	Применим ко всем типам водоносных горизонтов, содержит специальные инструменты для карстовых условий, не требует большого количества детальных данных	Не требует большого количества детальных данных, применим ко всем типам водоносных горизонтов, результаты напрямую могут использоваться для выделения водоохраных зон	Применим ко всем типам водоносных горизонтов, не требует большого количества детальных данных, учитывает взаимодействие поверхностных и подземных вод
Недостатки	Нет инструментов для карста, сложная индексно-рейтинговая система, большое кол-во данных в виде регулярной сетки, слишком много классов уязвимости	Применим только для карстовых районов малого размера, противоречивые весовые коэффициенты и система баллов, регулярная сетка вводимых данных	Требует большого количества исходных данных, эпикарст оценивается как негативный фактор, переоценка уязвимости для высоко закарстованных зон	Спорная оценка некоторых параметров, как, например, фактор влияния активных поноров	Пока что недостаточно апробирован	Низкая дифференциация по классам уязвимости внутри закарстованных районов	Необходима регулярная сетка вводимых данных, неприменим для оценки полной уязвимости, пока что недостаточно апробирован

Тестовая версия Горно-Крымской методики оценки УКПВ была нами разработана и апробирована ранее на примере Ай-Петринского карстового района (Шестопалов и др., 2009). Полученные результаты показали довольно высокую мозаичность и неравномерность распределения площадей с различной уязвимостью. По всей видимости, это 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 мы и воспользовались 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 – очень низкой. Таким образом, противоречивость масштаба исходных данных не позволила получить высококондиционную 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. 3.3). 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 результатом 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.

Таблица 3.3. 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	Гидро- геологическое районирование	Индексно-рейтинговые	Индексно-рейтинговые, математическое и статистическое моделирование
Исходные данные	Геологические и гидрогеологическ ие 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 слабопроницаемы ми 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

Первостепенной задачей данного исследования поставлена оценка и картирование УПВ с масштабом 1:50 000 – 1:100 000, под который и была адаптирована оценочная схема и подобраны 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.

Основной проблемой при разработке индексно-рейтинговых методов оценки известно является определение весовых коэффициентов для оцениваемых факторов, поскольку каждый из них имеет разную степень влияния на формирование интегрального оцениваемого показателя (в нашем случае – УКПВ). Зачастую, для этого привлекаются эксперты, хорошо знакомые с предметом оценки. При разработке оценочных коэффициентов для Горно-Крымской методики также привлекалось мнение специалистов, являющихся ведущими экспертами в понимании карста и гидрогеологии ГК. Определение весов для факторов УКПВ производилось исходя из двух критериев: 1) роль отдельных факторов в формировании УКПВ, 2) возможность и точность картирования факторов УКПВ. По каждому из факторов УКПВ экспертам предлагалось дать оценку по обоим критериям. В случае 1-го критерия было предложено 4 градации: отсутствующая (0), малозначимая (1), существенная (2) или ведущая роль (3) в формировании УПКВ. По 2-му критерию также выделялось 4 градации: (1) картирование фактора проблематично, (2) картирование возможно, но с ограничениями (не все картируемые объекты известны); (3) картирование не имеет ограничений, но точность низкая (определение точных границ объектов проблематично); (4) картирование не имеет ограничений, точность высокая. Данная схема является подобием широко известного метода анализа иерархий, предложенного Т. Саати для экспертных оценок (Саати, 2008). По итогам проведенных опросов была составлена матрица, определяющая весовой коэффициент для каждого из факторов (табл. 3.4).

Итоговая схема оценки представлена на рис. 3.1.

***О-индекс (защищенность покровами).***

Комплексный показатель “О” 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, мы вводим в оценку показателя “О” фактор эпикарста и подпочвенного слоя (Oe). Выделяемые категории и присваиваемые им значения в оценке почвенного покрова (Os), литологии (OL), а также результирующие рейтинговые категории показателя “О” в целом приняты из предшествующих методов (COP, Словенский подход).

Таблица 3.4. Схема критериев определения весовых коэффициентов для различных факторов УКПВ в Горном Крыму

		Роль в формировании уязвимости КПВ в Горном Крыму			
		0 – отсутствует	1 – мало-значимая	2 – существенная	3 - ведущая
Возможность и точность картирования	1 - проблематично	0	1	2	3
	2 - возможно, с ограничениями	0	2	4	6
	3 - без ограничений, низкая точность	0	3	6	9
	4 - без ограничений, высокая точность	0	4	8	12

*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, имеющих преимущественно глинистый и суглинистый механический состав, 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 (Каплюк, 1968, 1973), полуметровая толща почвы обладает весьма высокой водоудерживающей способностью (полевая влагоемкость до 300 мм), тем самым обеспечивая значительную защитную функцию по отношению к подземным водам. Таким образом, по сравнению с базовыми методами, оценочная шкала по данному фактору была немного сдвинута в сторону больших значений присваиваемых баллов. Граничные значения мощностей почв приняты по аналогии с картой почвенного покрова, построенной при воднобалансовых изысканиях на массиве Ай-Петри (Приблуда и др., 1979).

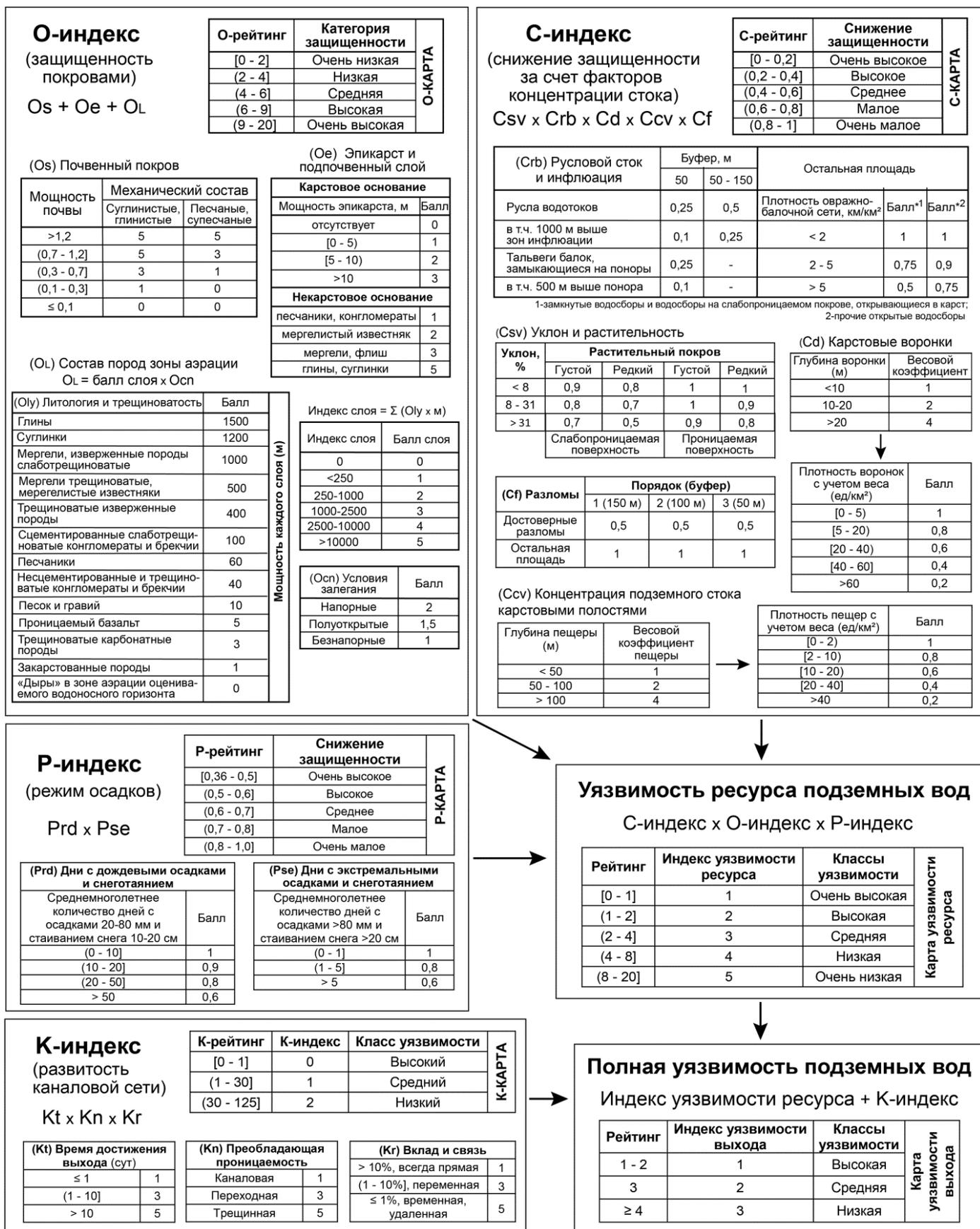


Рис.3.1. Схема Горно-Крымской модификации метода оценки собственной уязвимости карстовых подземных вод.

*Состав пород зоны аэрации ( $O_L$ ).* Оценка фактора производится по каждому слою или толще, для которых качественные или количественные характеристики проницаемости принимаются условно-однородными. Значения, присваиваемые различным литологическим разностям, приведены в таблице "Литология и трещиноватость" на рисунке 4.1. Показатель " $O_L$ " определяется умножением этих значений на мощность и коэффициент напорных условий. Алгоритм оценки позаимствован у метода COP. Нововведением является выделение «дыр» в зоне аэрации с присваиванием им нулевого значения " $O_L$ ". Под «дырами» в зоне аэрации понимается выход на поверхность водоупорного цоколя в области питания оцениваемого водоносного горизонта (например, котловина Бештекне).

*Эпикарст и подпочвенный слой ( $O_e$ ).* В связи с особой гидрогеологической и морфогенетической ролью эпикарстовой зоны в верхней части экспонированной карстующейся толщи, мы вводим оценку эпикарста в показатель " $O$ ", 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 заполнены почвенным материалом, что усиливает водоудерживающую способность эпикарста. Основными показателями эпикарста, влияющими на его защитную функцию, являются его мощность (варьирует в пределах массива от 1-2 до 20-30 м) и контрастность нижней границы. Площадная изменчивость последнего свойства может быть выявлена лишь детальными геофизическими (георадарные методы) исследованиями, которые в Горном Крыму производились лишь фрагментарно (Климчук и др., 2012). 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 некарстующиеся породы (глины, песчаники, конгломераты и др.), значение  $O_e$  присваивается в зависимости от литологии подпочвенного горизонта, которая обуславливает выполняющую последним защитную функцию.

Результаты оценки показателя " $O$ " выражаются в  $O$ -карте, получаемой путем сложения факторов " $O_s$ ", " $O_L$ " и " $O_e$ " и рейтингового ранжирования площадей. Эта карта отражает степень защищенности подземных вод.

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

Показатель " $C$ " 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 Классическом карсте в связи с широким развитием контактных условий (переходом руслового стока с некарстовых площадей на карст) и крупных полей и озер. В пределы карстовых массивов Горного Крыма крупные поверхностные водотоки не поступают, значительные периодические озера (связанные с характерными для полей 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, как фактор концентрации поверхностного стока, поверхностная закарстованность должна учитываться по конкретным категориям форм и комплексов с учетом их гидрологической функциональности. В разработанной и реализованной модификации метода учитываются следующие факторы концентрации поверхностного стока (рис. 4.1):

- "Сrb" – русловой сток и инфлюация. Предложено выделять два пояса буферных зон вокруг русел водотоков (действующих большую часть года), с учетом близости к зонам линейной инфлюации в местах пересечения руслами закарстованных участков с повышенной трещиноватостью пород, связанных с разломами. Аналогично оцениваются тальвеги балок, замыкающиеся на активные поглотители. Остальная площадь оценивается по плотности овражно-балочной сети, поскольку в тальвегах балок также происходит (хоть и кратковременно) концентрация поверхностного стока и быстрый его перевод в

подземных сток, что снижает защищенность подземных вод. Концентрация поверхностного стока на склонах карстовых массивов является значительно менее критичной для УКПВ, чем концентрация стока в замкнутых водосборах и на слабопроницаемых покровах выше карста. Это следует из того, что в первом случае большая часть поверхностного стока выводится за пределы карстового массива, а, следовательно, и за пределы карстового водоносного горизонта. Во втором случае поверхностный сток неминуемо попадает в КПВ, что увеличивает их уязвимость. Поэтому в разработанной методике оценку фактора плотности овражно-балочной сети для обозначенных случаев предлагается производить отдельно.

- “Csv” – уклоны поверхности и растительность. Здесь приняты оценочные критерии и шкалы словенской схемы. На первом этапе разработки Горно-Крымского подхода мы не разделяли оцениваемую территорию на основании водопроницаемости выходящих на поверхность пород. Обычно априори считается, что карстовые массивы Горного Крыма не имеют слабопроницаемых покровов. Однако более детальное рассмотрение материалов геологического изучения ГК и полевые наблюдения выявили широкое распространение выходов на поверхность пород с низкой водопроницаемостью: аргиллитов, песчаников, мергелистых известняков. Сложенные этими породами водосборные площади часто находятся орографически выше закарстованных площадей, иными словами, «открываются» в карст. Особенно широко они распространены в пределах Ай-Петринского массива, который выступает в качестве тестового района оценки УПВ. Поэтому при оценке данного фактора было решено использовать критерии словенской методики с незначительной модификацией присваиваемых индексов. К категории «густая растительность» относятся участки с лесной и горно-лугово-степной растительностью с высоким проективным покрытием, в отличие от «редкой растительности» на участках с фрагментарным растительным покровом и низким проективным покрытием.

- “Cd” – карстовые воронки, выступающие очагами инфильтрации, иными словами – ЗБФМ загрязнителей. Оценка производится на основании карты пространственной концентрации воронок, поскольку выделение буферных зон для каждой воронки в избранном масштабе картирования представляется нецелесообразным. Так как гидрогеологическая функция воронок зависит от их морфометрических параметров, построение карты концентрации воронок производится с учетом веса, определяемого их размерами (в данном случае – глубиной).

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

- “Cf” – тектонические нарушения (разломы). Приразломные зоны представляют

собой зоны концентрированной быстрой фильтрации в трехмерном объеме зоны аэрации, обеспечивающие быстрый перевод стока и потенциальных загрязнителей к фреатической зоне, а, следовательно, являются зонами высокой уязвимости. Ширину приразломной зоны высокой водопроницаемости определяют по протяженности разлома с использованием эмпирической формулы (Алешин и др., 1982). Так, для разрывов глубокого заложения, имеющих в пределах региона длину до 60 км, расчетная ширина зоны высокой водопроницаемости составляет 300 м, для межблоковых разрывов средней длиной 20 км – 130 м, для внутриблоковых разрывов длиной от 1 до 14 км – 60 м (Дублянский и др., 1991). Из этих соображений размеры буферных зон, присваиваемые разломам, определяются исходя из их порядка (от региональных к внутриблоковым). Принятый коэффициент снижения защищенности подземных вод для таких зон составляет «0,5», что соответствует снижению защищенности в два раза.

- “Ccv” – карстовые полости. Вертикальные пещеры (шахты) могут выступать в качестве активных проводников стока из эпикарстовой зоны во фреатическую зону, минуя вадозную зону. Оценка фактора производится подразделением пещер на несколько категорий по глубине и гидрологической активности, в зависимости от чего каждой пещере присваивается весовой коэффициент. 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 “Crb”, “Csv”, “Cd”, “Cf” и “Ccv” 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.

#### ***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 12 лет. Большое количество осадков высокой интенсивности обуславливает увеличение поверхностного стока, возрастание скоростей движения подземных вод и турбулентности, транспортирующей способности по отношению к взвешенным частицам и связанным с ними микробными патогенами и химическими загрязнителями, мобилизацию плотных неводных жидких загрязнителей и т.п., т.е. увеличивает уязвимость подземных вод.

В базовой 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 количества дней с интенсивным стаиванием снега (рис. 4.1).

Результирующая карта собственной уязвимости ресурса подземных вод складывается путем умножения показателей “O”, “C” и “P” и ранжирования итоговых значений, с выделением следующих классов (зон) уязвимости (рис. 4.1): 1) Очень высокой; 2) Высокой; 3) Средней; 4) Низкой; 5) Очень низкой.

***К-индекс (карстовый сток в зоне полного насыщения).***

К-показатель отражает преимущественно латеральное движение подземных вод в насыщенной зоне к источникам или скважинам (сегмента 2 на рисунке 3.2). Этот показатель включается в оценку и картирование уязвимости выходов подземных вод (полной уязвимости) (рис. 4.1). Принятая схема оценки идентична предложенной в Словенском подходе. Для такой оценки 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 водопрводящих каналов (зон).

## **Выводы**

Сравнительный анализ существующих методик оценки уязвимости карстовых вод показал, что ни одна из них не подходит условиям Горного Крыма в полной мере, ввиду недостаточного учета ими особенностей условий формирования подземных вод данного региона, а также наличия методологических упущений в оценочных схемах. Решение этой проблемы видится в: 1) выборе наиболее развитых и адекватных данным условиям методик, 2) их правки в части отдельных концептуальных упущений, 3) дополнительной адаптации к региональным условиям оцениваемой территории (Горного Крыма). Установлено, что наиболее подходящими методами оценки уязвимости карстовых вод в пределах отдельных массивов Горного Крыма являются индексно-рейтинговые методы.

На основе общей европейской методологии и производных из нее частных методов (Словенский подход, метод “COP”) нами разработана методика оценки уязвимости карстовых подземных вод для Горного Крыма, методологически усовершенствованная и адаптированная к региональным условиям формирования карстовых вод, с учетом уровня их изученности и имеющихся данных о факторах уязвимости, получившая рабочее

название «Горно-Крымский подход». Методика рассчитана для оценки и картирования УКПВ в крупнорегиональном масштабе (1:50 000 – 1:100 000). Усовершенствование и адаптация базовых методов заключалась в введении в оценочную схему дополнительных факторов уязвимости подземных вод, в том числе защитной функции эпикарста (показатель “О”), факторов концентрации подземного стока в зоне аэрации вдоль разломных зон и через глубокие карстовые полости, линейной инфлюации руслового стока в местах пересечений водотоков зонами тектонической трещиноватости (показатель “С”), питания карстовых вод за счет твердых атмосферных осадков (показатель “Р”). 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 индивидуальных характеристик посредством весовых коэффициентов. Определение весовых коэффициентов для введенных 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.

В итоговой модифицированной схеме оценки уязвимости карстовых вод (Горно-Крымская методика) присутствует следующий набор оцениваемых факторов. Группа факторов защищенности покровами (показатель “О”) включает почвенный покров (Os), состав пород зоны аэрации (Ol), эпикарст и подпочвенный слой (Oe). Группа факторов снижения защищенности за счет концентрации стока (показатель “С”) включает следующие факторы: русловой сток и инфлюация (Crb), уклон и растительность (Csv), очаговая инфильтрация в карстовых воронках (Cd), концентрация подземного стока карстовыми полостями (Ccv), концентрация подземного стока разломными нарушениями (Cf). Группа факторов снижения защищенности за счет режима осадков (показатель “Р”) включает учет среднемноголетнего количества дней в году с осадками средней интенсивности (от 20 до 80 мм/сут.) (Prd) и дней с экстремальными осадками (свыше 80 мм/сут.) (Pse). Группа факторов карстового стока в зоне полного насыщения (показатель “К”) включает время прохождения загрязнителя от места сброса к выходу (Kt), развитость карстовой системы (Kn) и вклад отдельных участков водосбора в формирование оцениваемых проявлений карстовых вод (Kr).

## ГЛАВА 4

### ОЦЕНКА И КАРТИРОВАНИЕ УЯЗВИМОСТИ КАРСТОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ПРИМЕРЕ АЙ-ПЕТРИНСКОГО МАССИВА

#### 4.1. Общая характеристика условий формирования карстовых вод тестового района

В качестве полигона для отработки методик оценки УКПВ в Горном Крыму был выбран карстовый массив Ай-Петри. Выбор Ай-Петринского массива в качестве района исследования был сделан по следующим соображениям.

1. Поверхность массива Ай-Петри является основной областью питания региональной карстовой водообменной системы западной части Горного Крыма. Данная КВС является крупнейшей в Крыму, обеспечивая питьевыми водами Севастополь, Большую Ялту и Бахчисарайский район. Это обуславливает высокую актуальность задачи оценки УКПВ в Ай-Петринском районе.

2. Это наиболее сложный район ГК по геологическим, гидрогеологическим и геоморфологическим условиям. Для толщи массива характерна высокая литологическая изменчивость (наряду с известняками встречаются мергели, глины, песчаники и конгломераты), сложный структурный план (блоковая структура с многочисленными разрывами) и гидрогеологический разрез (этажность массива по гидрогеологическим условиям), неясная подземная гидрография, а также высокая и, при этом, весьма неравномерная закарстованность. Таким образом, отработка методики в этом районе в дальнейшем должна упростить задачу оценки УКПВ в других карстовых районах ГК.

3. Ай-Петринский массив отличается высоким уровнем изученности геологических и гидрогеологических условий. На Ай-Петри проводились детальные водно-балансовые исследования (Приблуда и др., 1979), численное моделирование подземного стока (Шестопалов и др., 2008). Количество известных и отснятых карстовых полостей массива превышает 500 единиц. В выбранном районе и его ближайшей окрестности проводились масштабные изыскания (разведка геофизическими и буровыми методами), в том числе в связи со строительством крупных гидротехнических сооружений (Комплексные изыскания, 1971). Наличие необходимой для оценки УКПВ обширной информации о геологических и гидрогеологических условиях позволяет получить более надежные результаты.

4. Ай-Петринский район отличается высокой степенью хозяйственной освоенности и в настоящее время испытывает наибольший в ГК антропогенный пресс. В первую очередь, это обусловлено близостью массива к крупнейшим рекреационным центрам Крыма и его транспортной доступностью с развитой инфраструктурой сообщения. Как

следствие, возникает высокая угроза загрязнения подземных вод массива, что определяет первостепенную важность оценки УКПВ в этом районе.

Массив Ай-Петри характеризуется в целом высокой, но весьма неравномерной закарстованностью. Тут задокументировано свыше 500 пещер и свыше 1500 воронок. На рисунке 4.1 показано их распределение, а также контуры зон их наиболее высокой плотности. В Восточно-Айпетринском и Западно-Айпетринском подрайонах зоны высокой плотности пещер тяготеют к прибрежной (южной) части плато, а в Центрально-Айпетринском такая зона пересекает массив в северо-западном направлении, по простиранию одного из крупных разломов. Зона высокой плотности воронок занимает Центрально-Айпетринскую котловину и также вытягивается к северо-западу в Центрально-Айпетринском подрайоне. Для платообразных поверхностей характерно слабое вертикальное и горизонтальное расчленение и высокая закарстованность. На склонах массивов это соотношение изменяется на противоположное. Практически все участки высокой закарстованности находятся в пределах бессточной яйлинской поверхности массива. Наибольшая закарстованность свойственна высотной зоне 1200-1100 м. Здесь отмечается самый высокий коэффициент поверхностного закарстования ( $K=18,0$ ) среди Крымских яйл (Вахрушев, 2009).

Согласно актуальным данным кадастра пещер Крыма, среди известных карстовых полостей района выделяются 16 крупных полостей (с протяженностью ходов более 500 м и амплитудой более 100 м) и 75 значительных по размерам полостей (с протяженностью ходов более 100 м и амплитудой более 50 м). Из них 12 полостей имеют разведанную глубину 100 и более метров, 6 полостей имеют протяженность ходов 500 и более метров. Глубочайшей полостью массива является пещера-шахта Каскадная с глубиной 400 м. Она является единственной полостью Ай-Петринского массива, пройденной на всю мощность вадозной гидродинамической зоны: от поверхности плато, где расположен вход в пещеру, до уровня фреатической зоны (зоны полного насыщения).

К карстовым полостям нижних гидродинамических зон массива (фреатическая и эпифреатическая зоны) относятся пещеры-источники, характеризующиеся наибольшей протяженностью среди полостей района. К ним относятся пещеры Скельская (длина 670 м), Черная (1260 м), Узунджа (1500 м), Байдар-Чокрак (1235 м) и другие. Они расположены в основании карбонатной толщи массива, индицируя свои положением основные зоны разгрузки карстовых вод. Так, например, крупнейший карстовый источник Ай-Петринского массива Скельский связан с пещерой Черной.

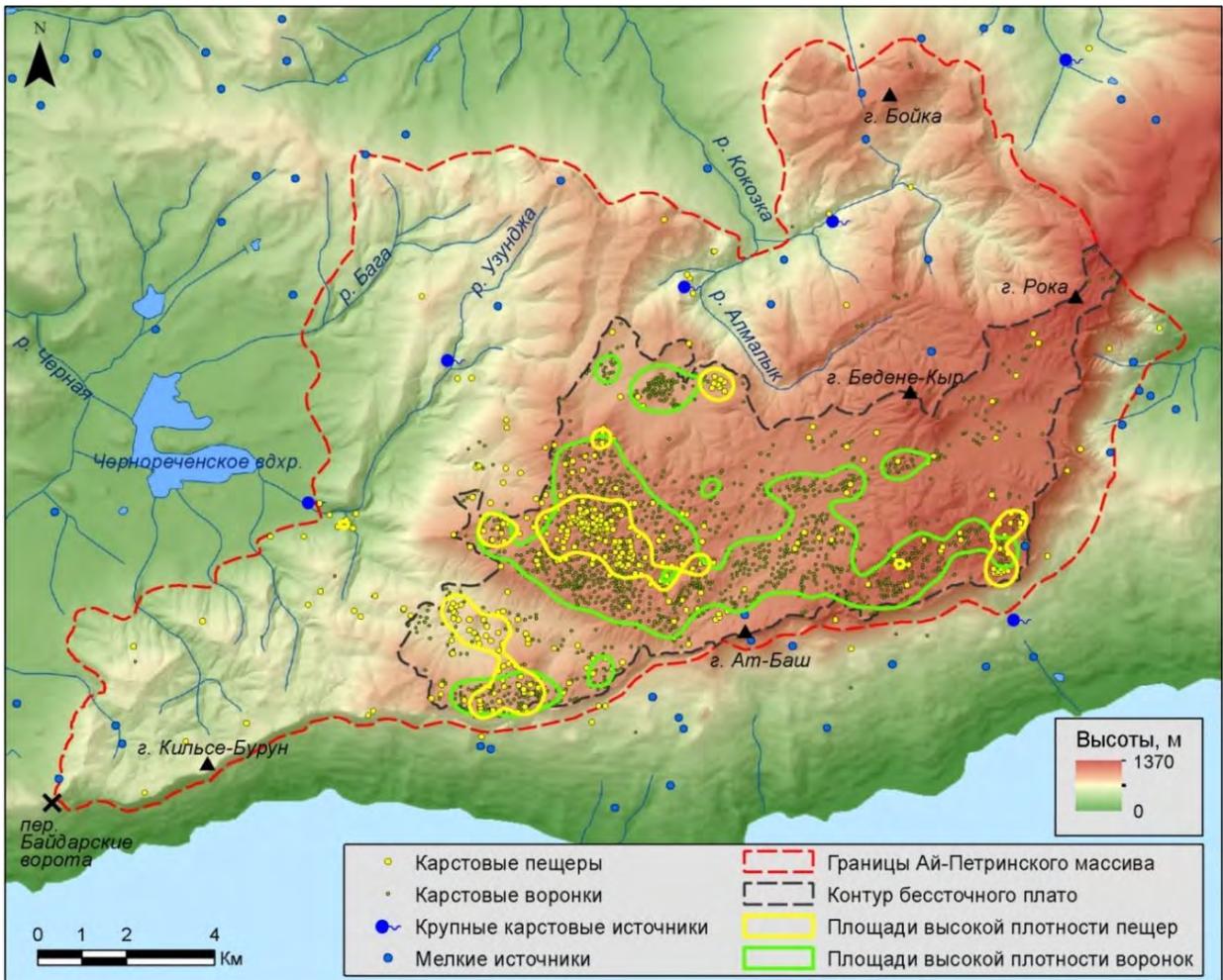


Рис. 4.1. Распределение основных карстопоявлений в пределах Ай-Петринского массива.

Поверхностная гидрография оцениваемого района имеет весьма неравномерное распределение. Относительно высокая плотность водотоков отмечается на северном и северо-западном склонах массива. Большинство водотоков имеет временный характер. Единичные постоянные и наиболее крупные водотоки имеют преимущественное питание за счет карстовых источников (р. Черная – источник Скельский, р. Аузун-Узень – источник Пания, р. Сары-Узень – источник пещеры Желтой). Режим расхода таких водотоков синхронен режиму питающих их источников. Периодические водотоки на склонах массива кроме подземного карстового питания имеют также значительное снеговое и дождевое питание. На плато массива поверхностная гидрографическая сеть практически отсутствует, за исключением некоторых балок с периодическим стоком (верховье р. Алмалык) и мелких ручьев на некарстующемся основании (котловина Бештекне).

В пределах массива Ай-Петри распространение почв крайне неравномерно. На значительных площадях почвы не образуют сплошного покрова, а заполняют трещины и полости верхней части эпикарстовой зоны (рис. 4.2). Преобладают горно-луговые выщелоченные почвы на платообразной поверхности и горно-лесные бурые на склонах яйлы. Для них характерна различная степень оглиненности и скелетности, высокая вариативность мощности, динамичный водный режим. Они отличаются хорошей водопроницаемостью, высокой гигроскопичностью, имеют небольшой диапазон активной влаги (20-30 мм), довольно быстро иссушаются летом и быстро насыщаются весной. Их хорошие инфильтрационные свойства (коэффициент фильтрации 1,18-1,84 м/сут) способствуют быстрому поглощению дождевых и талых вод (Дублянский, 1967).

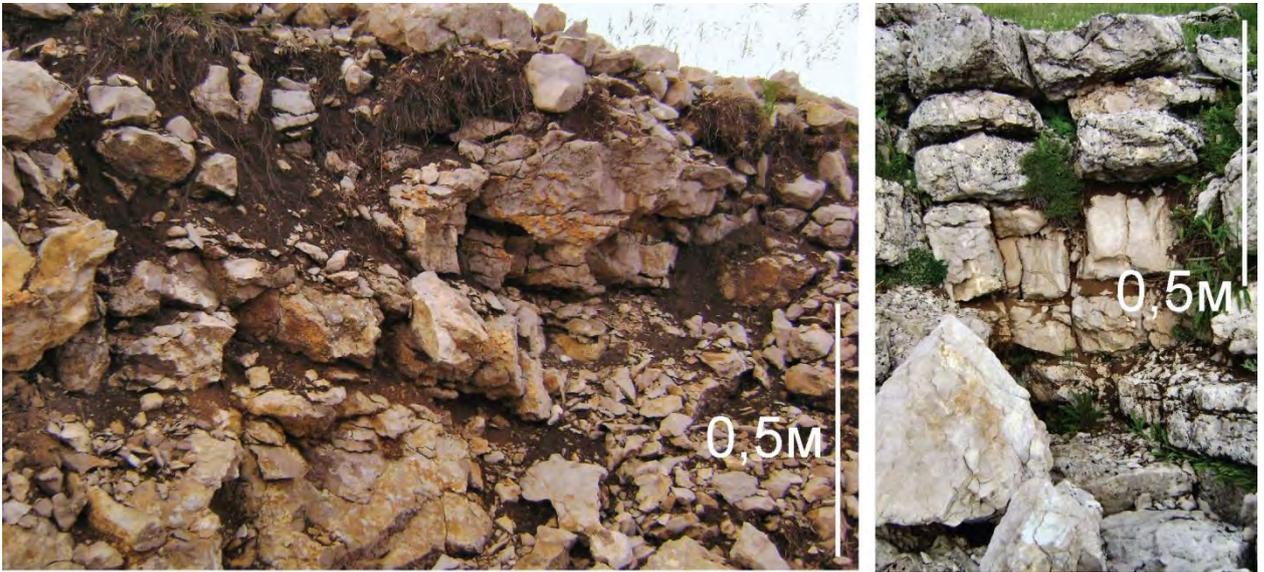


Рис. 4.2. Профили верхней части эпикарстовой зоны с почвенным заполнителем трещин.

Наибольшее влияние на уязвимость подземных вод имеет инфлюационное питание, которое довольно широко, хотя крайне дискретно, представлено в пределах Ай-Петринского района. На вершинной поверхности плато периодическая инфлюация возможна на многих участках при ливнях и бурном снеготаянии. Временный поверхностный сток в линейных понижениях рельефа наблюдается на расстоянии от десятков до первых сотен метров и поглощается крупными понорами и зонами трещинного поглощения.

Важным отличием массива Ай-Петри от районов Классического карста Словении, на которых отработывалась базовая Словенская методика оценки уязвимости подземных вод, является то, что в его пределы не поступает русловой сток, сформированный на некарстующемся основании. Массив Ай-Петри, с его приподнятым по отношению к

смежным некарстующимся площадям положением, является почти целиком областью автогенного питания. Лишь на небольшом участке котловины (поля – по Г.Н. Амеличеву, 2004) Бештекне (рис. 4.3) поверхностный сток, сформированный на среднеюрских аргиллитах и песчаниках, уходил в известняки. Сейчас поглощающий понор отгорожен от водосбора плотиной и очаговая инфлюация на данном участке отсутствует.

Вместе с тем, значительная часть русел водотоков проходит в пределах известняковых площадей, где они являются зонами линейной инфлюации. Ярким примером линейной инфлюации является р. Узунджа, которая берет начало в северо-западной части Ай-Петринского массива на склонах, обращенных к Байдарской котловине. Имея в верховьях родниковое питание, она характеризуется высоким коэффициентом вариации расхода ( $C_v=0,79$  при среднем расходе  $0,36 \text{ м}^3/\text{с}$ ) при весеннем снеготаянии и после дождей расход ее возрастает до  $0,6-0,7 \text{ м}^3/\text{с}$  и сток наблюдается от истока до устья (до впадения в р. Черную). Летом и осенью сток уменьшается до нуля, а зона полного поглощения смещается вверх по течению почти на 4 км. Детальные карстолого-гидрометрические работы выявили 6 участков линейной инфлюации протяженностью 200-400 м, тяготеющих к зонам тектонических нарушений, пересекающих долину (Шутов, 1971).

Круглогодичное инфлюационное питание наблюдается на сравнительно небольших участках плато и склонов, сложенных некарстующимися или слабокарстующимися породами (Западно-Айпетринский подрайон – свита деймен-дере, Центрально-Айпетринский подрайон – среднеюрские аргиллиты и песчаники поля Бештекне). Эти водотоки имеют постоянный сток с расходами, варьирующими от сотых долей литра до  $0,8-1,5 \text{ м}^3/\text{с}$ .

В районе поля Бештекне породы среднеюрского (водоупорного) цоколя наиболее приподняты и выходят на поверхность в западной части поля (Амеличев, 2004). Это делает его ключевым в распределении стока центрального Ай-Петри в разных направлениях, что демонстрируется результатами экспериментов по трассированию (рис. 2.8). В отношении уязвимости подземных вод этот участок также имеет особое значение, демонстрируя полную раскрытость водоносного горизонта (на всю мощность, до подошвы) в области его питания.



Рис. 4.3. Котловина (полье) Бештекне в центральной части Ай-Петринского массива.

Оценка показателей подземного стока Ай-Петринского массива проводилась неоднократно различными авторами в разных масштабах. Первым из известных авторов этим вопросом занимался Н.А. Плотников, который после 1945 г. на основании некоторых экспериментальных работ оценивал величину питания подземных вод на Ай-Петринской яйле в 56-58 % от величины атмосферных осадков (Альбов, 1970). Позже М.В. Чуринов оценил питание подземных вод в пределах Ай-Петринской яйлы на участке площадью 64 км<sup>2</sup> в 80 % от суммы осадков, что составило около 47 млн. м<sup>3</sup>/год (Чуринов, 1962). Подземный сток для всей юго-западной части ГК по его оценкам составил 156 млн. м<sup>3</sup>/год. По расчетам С.В. Альбова (Альбов, 1970), выполненных на основе многолетних наблюдений в восточной части плато Ай-Петри, на площади всего Ай-Петринского массива поступает в среднем 59 млн. м<sup>3</sup>/год. Из этого объема примерно 9 млн. м<sup>3</sup> в год разгружается через источники южного склона массива, 2,5 млн. м<sup>3</sup>/год на северном склоне, 42 млн. м<sup>3</sup>/год выходят из Скульского источника на западном подножье массива, а остаток (около 5 млн. м<sup>3</sup>/год) идет на питание бассейна Байдарской котловины. Позже были проведены детальные многолетние (1963-1976 гг.) водно-балансовые работы на территории, совпадающей с Западно- и Восточно-Ай-Петринскими карстовыми подрайонами. По результатам работ был произведен расчет показателей стока массива (Приблуда и др., 1979). Поверхностный сток балансового бассейна, подавляющая часть которого формируется за счет разгрузки карстовых источников массива, составил 160 тыс. м<sup>3</sup>/сут (58,6 м<sup>3</sup>/год). Подземный сток в глубокие водоносные горизонты в направлении

Байдарской котловины был оценен в 162,7 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

Современная оценка стока района исследования проводилась с помощью численного моделирования (Шестопалов и др., 2008). Согласно ее результатам прогнозные естественные ресурсы юго-западной части Горного Крыма составляют 471 тыс. м<sup>3</sup>/сутки. Оцененная суммарная разгрузка подземных вод данного региона в виде родникового стока составила примерно 176 тыс. м<sup>3</sup>/сутки. Расчетная разница составляет 295 тыс. м<sup>3</sup>/сутки. Она складывается из донной разгрузки в реки, субмаринной разгрузки и разгрузки мелкими родниками. Тогда же была проведена оценка суммарного инфильтрационного питания по площади Ай-Петринского массива. Рассчитанное значение суммарной инфильтрации составило около 244 тыс. м<sup>3</sup>/сутки (89 м<sup>3</sup>/год), что соответствует модулю питания 14,11 л/с·км<sup>2</sup>, или 445 мм/год. Это в 4 раза превышает значение питания, полученное в среднем по всей юго-западной части Горного Крыма (3,6 л/с·км<sup>2</sup>).

#### **4.2. Исходные данные и процедура картирования факторов уязвимости карстовых подземных вод**

Для оценки и картирования УКПВ необходим комплекс пространственно координированных данных (геоданных) по отдельным факторам уязвимости. Сбор и организация этих данных, их обработка в ходе процедуры оценки, а также картографическая визуализация результатов оценки производятся с использованием геоинформационных технологий (ГИС).

В рамках данного исследования все виды работ с геоданными (в том числе, перевод «бумажных» данных в цифровые) выполнялись в программной среде ArcGIS 10. Подготовительные работы включали сбор, оцифровку и геокодирование всех доступных материалов и данных, характеризующих условия формирования и факторы уязвимости карстовых вод, создание соответствующих баз геоданных и тематических карт в форматах, пригодных для геовизуализации и геообработки методами ГИС-технологий. Собранные и созданные материалы и данные интегрированы в виде базы геоданных «Уязвимость карстовых вод Ай-Петринского массива» и характеризуют:

- геоморфологические условия, рельеф, поверхностное закарстование (в том числе, эпикарст) – получены на основе анализа топографических карт, цифровых моделей рельефа (ЦМР), космоснимков различных масштабов, полевых работ;

- геология и тектоника – на основе геологических карт различных масштабов, фондовых материалов, ЦМР;

- подземное закарстование – на основе фондовых материалов (кадастр карстовых полостей Крыма), данных текущих спелеологических исследований, опубликованных

материалов и полевых работ;

- гидрогеологические условия – на основе опубликованных и фондовых материалов.
- почвенный и растительный покров, – на основе фондовых материалов, космоснимков, топографических карт, ЦМР, полевых работ.

Основной базой для подготовки данной работы послужили фондовые материалы Института спелеологии и карстологии (ИСК) при Крымском федеральном университете им. В.И. Вернадского (до 2014 г. – Украинский институт спелеологии и карстологии при Таврическом национальном университете). К ним относятся, прежде всего, ГИС «Карст Крыма», база данных «Кадастр карстовых полостей Крыма», отчеты по научно-исследовательским работам. В создании и развитии этих ресурсов автор принимал непосредственное участие.

Также использовались фондовые материалы различных организаций, работавших/работающих в Крыму в сфере геологии, гидрологии, гидрогеологии: КП «Южэкогеоцентр», Ялтинской гидрогеологической и инженерно-геологической партии, Института минеральных ресурсов (позже – Крымское отделение Украинского государственного геологоразведочного института). Заимствовались данные из научно-производственных отчетов, различных карт, материалов многолетних наблюдений, выполнявшимися этими организациями.

Для создания детальной рельефной основы для геовизуализации и пространственного анализа прочих геоданных выполнена сплошная векторизация горизонталей крупномасштабных топографических карт на всю площадь района оценки. По оцифрованным горизонталям методом интерполяции с использованием инструмента TороToRaster (заложен в расширении Spatial Analyst) построена детальная цифровая модель рельефа с разрешением 5 метров. Эта цифровая модель послужила основой для создания серии аналитических карт (крутизны склонов, направлений и концентрации стока, замкнутых водосборов, сети тальвегов), выделение элементов рельефа (котловин, возвышенностей, карстовых воронок), детального линеamentного анализа, а также для геовизуализации исследуемой территории в трехмерных сценах с различной нагрузкой.

Перед процедурой оценки все исходные данные были переведены в векторный формат «shape». После этого на их основе производились полигональные слои по отдельным факторам уязвимости с присвоением полигонам соответствующих индексов в их таблице атрибутов. Далее, с помощью оверлейных операций, эти полигональные слои объединялись наложением с помощью инструмента «Union» в слои по группам факторов уязвимости “O” и “C” с сохранением атрибутивной информации по каждому из факторов (касательно групп факторов “P” и “K” дано объяснение ниже, в соответствующих

пунктах). В результате наложения получались слои полигонов, каждому из которых был атрибутирован определенный набор индексов по отдельным факторам уязвимости. Эти индексы подвергались арифметическим операциям с получением групповых индексов “О” и “С”. Полученные индексы ранжировались по 5 категориям, соответствующим уровням защищенности либо снижения защищенности. Далее полигональные слои групп факторов “О” и “С” также подвергались наложению с помощью инструмента «Union» с получением нового полигонального слоя. В его таблице атрибутов путем перемножения индексов “О” и “С” вычислялся итоговый индекс уязвимости, который ранжировался на 5 категорий уязвимости.

Процедура множественного наложения полигональных слоев, границы в которых весьма различаются, приводит к излишней мозаичности итоговой карты. Наличие на итоговой карте «осколочных» участков площадью менее 1 га мы воспринимаем как «шум», являющийся помехой как при общем восприятии карты, так и при работе с ней. Поэтому было принято решение по устранению таких участков путем их слияния с соседними полигонами по принципу наибольшей общей границы. Для этого использовался инструмент генерализации «Eliminate».

Описанная процедура картирования уязвимости ПВ в рамках данной работы была реализована в виде автоматического программного алгоритма, написанного с использованием модуля «Model Builder» в ArcGIS 10. Этот алгоритм позволяет автоматизировать процедуру оценки уязвимости ПВ. В качестве данных на входе необходимы полигональные слои по факторам уязвимости с атрибутами индексов. Схематично этот алгоритм представлен на рисунке 4.4.

### **4.3. Оценка уязвимости карстовых подземных вод с использованием Горно-Крымской методики**

#### ***О-индекс (защищенность покровами)***

##### *Почвенный покров (Os).*

Основой для оценки фактора Os послужила карта почво-грунтов масштаба 1:25 000, составленная Ю.П. Лукьяновым в рамках работ по оценке баланса подземных вод юго-западной части Горного Крыма (Приблуда и др., 1979). Покрытая почвенным картированием территория закрывает западную и центральную части Ай-Петринского массива. Картирование фактора “Os” в пределах остальной части оцениваемой территории производилось по установленной связи между почвенными разностями и занимающими ими элементами рельефа (Иванов, 1958), которая подтверждается литературными данными (Кочкин, 1967; Каплюк, 1968, 1973). Выделение ландшафтно-

геоморфологических элементов с типовыми почвенными условиями производилось на основе анализа цифровой модели рельефа, в том числе по уклонам поверхности. Для подтверждения имеющихся данных были проведены маршрутные полевые наблюдения, охватившие естественные и искусственные разрезы почвенного покрова (борта дорог, траншеи, входы в пещеры-поноры, ямы от упавших или выкорчеванных деревьев) (рисунок 4.5).

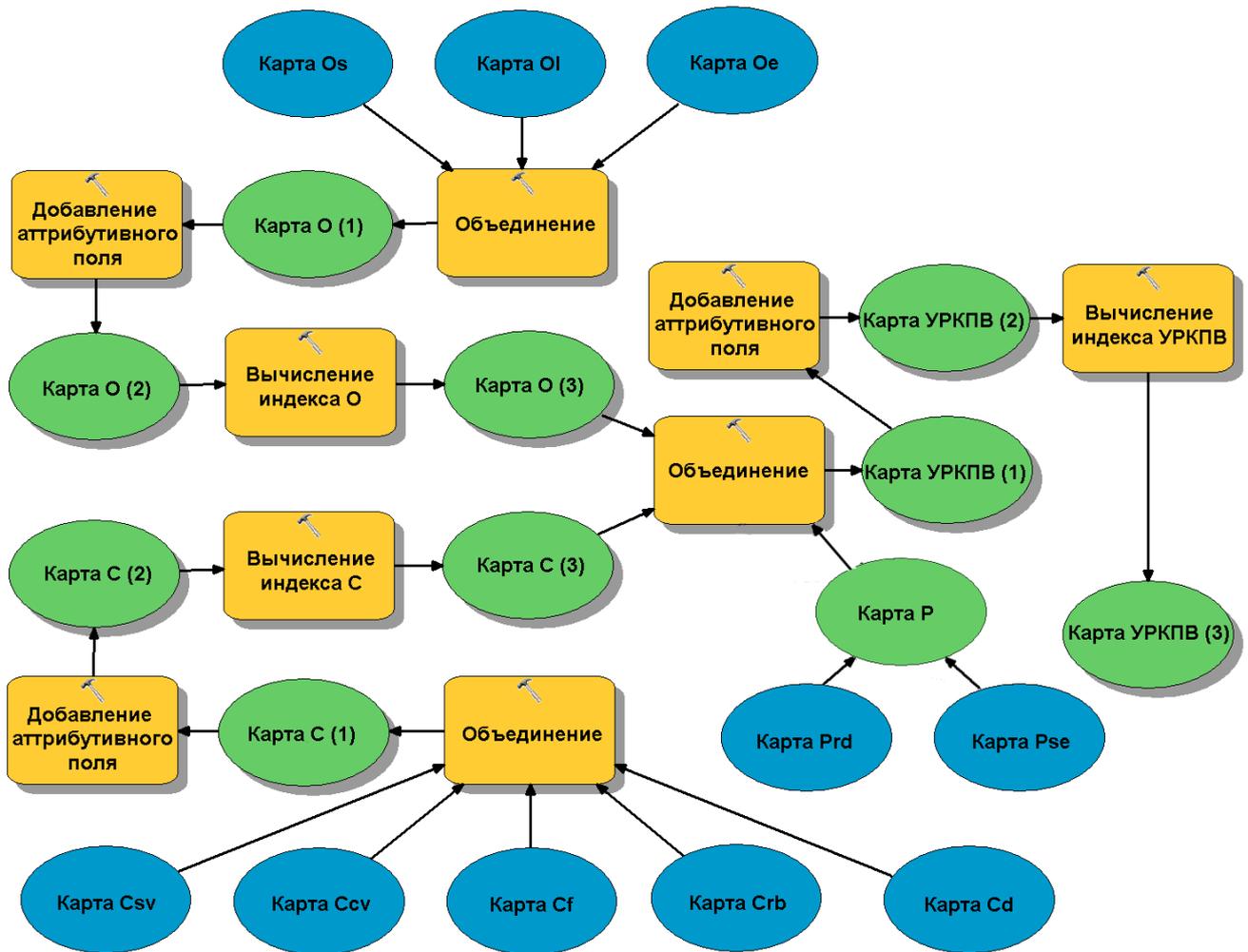


Рис. 4.4. Схема модели-алгоритма оценки уязвимости ресурса подземных вод согласно Горно-Крымской методике (синие блоки – слои с исходными данными, желтые – процедуры обработки, зеленые – производные слои, УРКПВ – уязвимость ресурса карстовых подземных вод).



Рис. 4.5. Траншея газопровода в восточной части Ай-Петринской яйлы – один из ключевых объектов маршрутных наблюдений почвенного покрова.

Полученные результаты позволяют судить о распределении разностей почв в пределах оцениваемой территории. Как и ожидалось, наибольшую площадь здесь занимают маломощные почвы (мощность до 0,3 м) – 62 %. Среднемощные почвы (мощность 0,3-0,7 м) распространены на 34,8 % площади, а мощные (мощность более 0,7 м) занимают всего 3,2 % территории. Результат оценки фактора “Os” представлен на рисунке 4.6, секция А.

*Состав пород зоны аэрации (O<sub>L</sub>).*

Картирование данного фактора основывалось на использовании данных геологических карт (Геологическая карта..., 1984). Верификация снятой с карт информации о литологии пород, выходящих на поверхность, проводилась посредством маршрутных наблюдений. В итоге была построена рабочая структурно-геологическая карта района, которая послужила основой для оценки фактора “O<sub>L</sub>” (рис. 4.7).

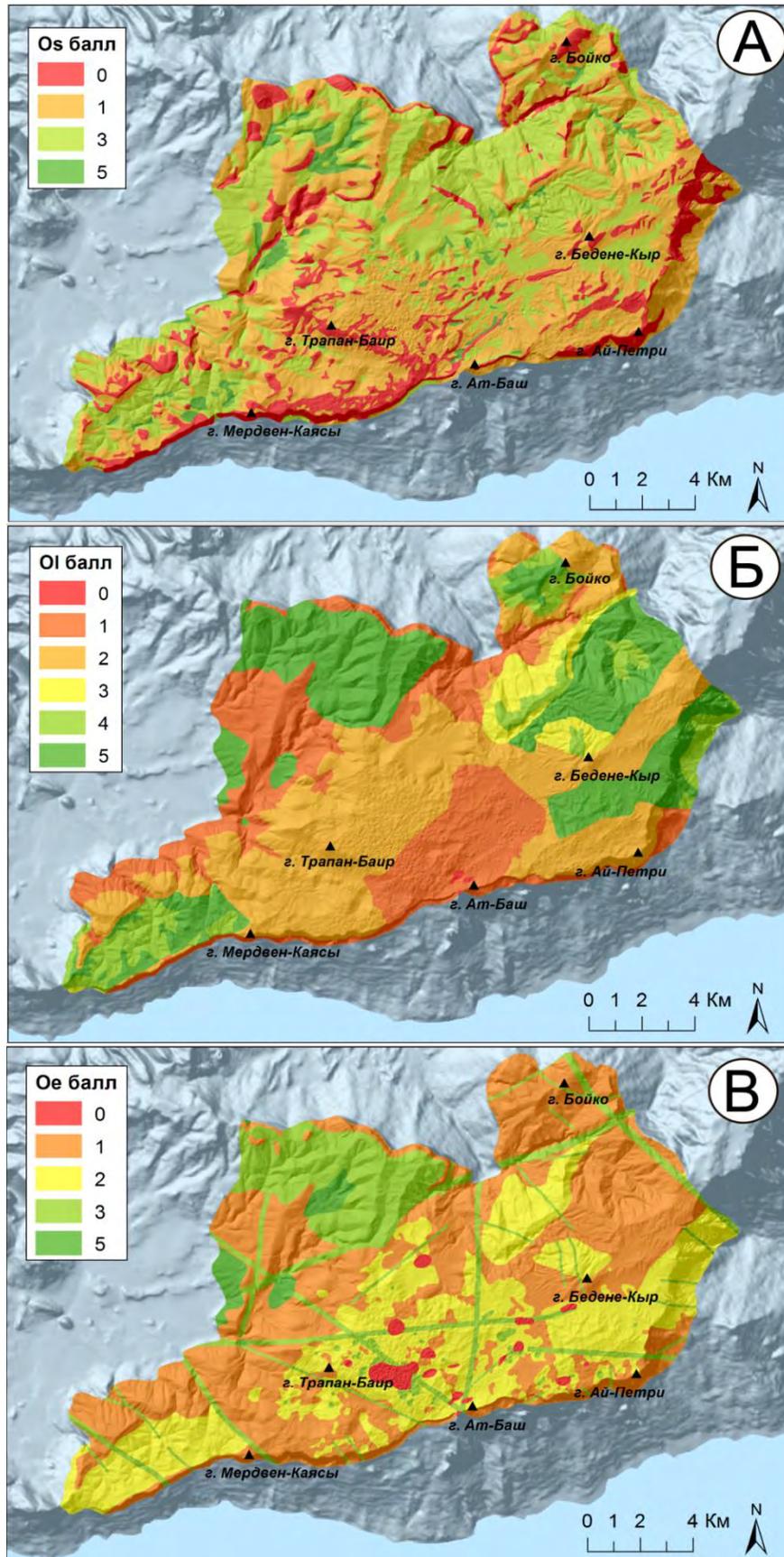


Рис. 4.6. Результаты оценки факторов защищенности покровами (факторы группы “О”): А – почвенный покров (Os), Б – состав пород зоны аэрации (Ol), В – эпикарст и подпочвенный слой (Oe).

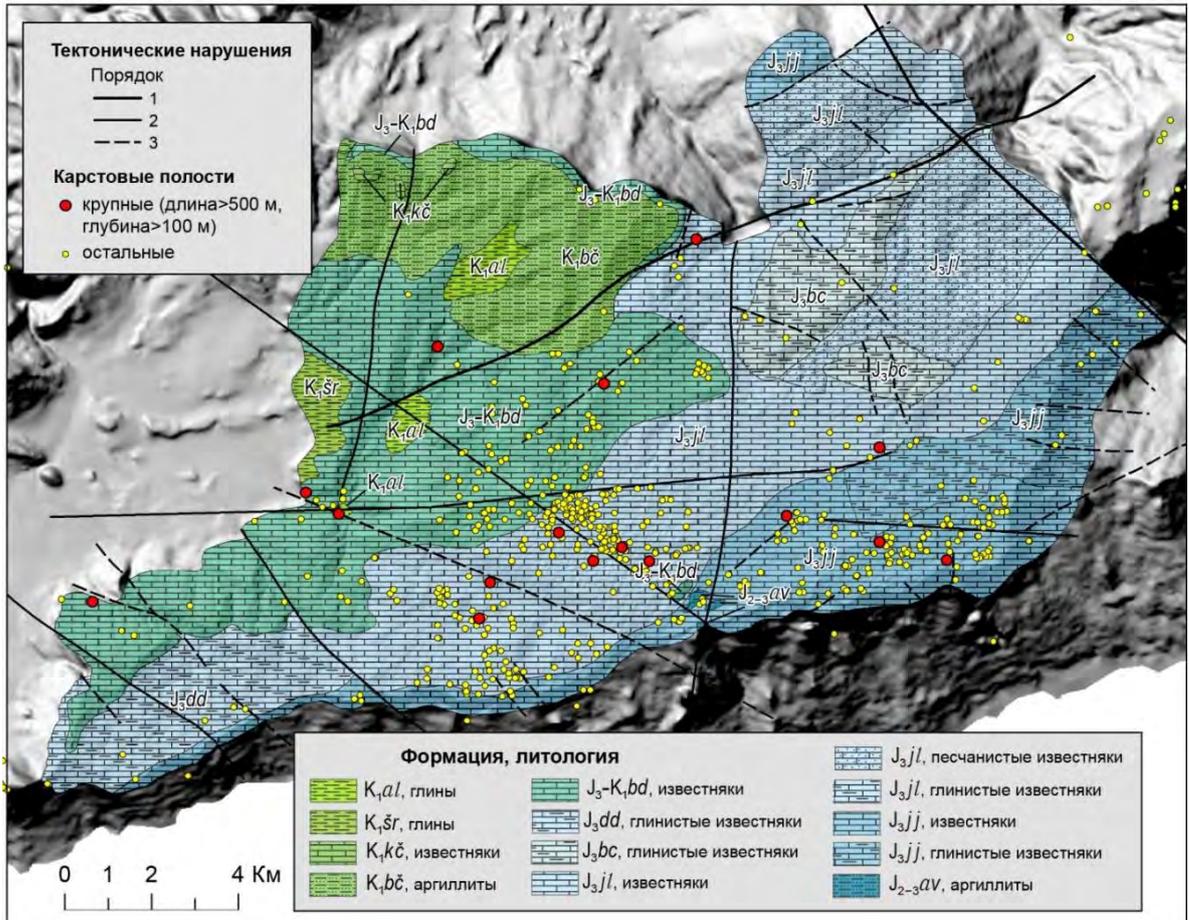


Рис. 4.7. Структурно-геологическая карта района оценки (построена на основе данных Геологической карты..., 1984).

Мощность зоны аэрации оценивалась по данным глубокого бурения (Чуринов, 1961) и спелеологической информации (Кадастр пещер Крыма). Нижняя граница зоны аэрации вычислялась посредством интерполяции между высотными отметками уровня подземных вод. К таким отметкам были отнесены уровни вод в буровых скважинах, отметки зоны полного насыщения в карстовых полостях, отметки выходов подземных вод в виде источников. По итогу процедуры интерполяции между точками с известными отметками была получена поверхность нижней границы зоны аэрации (соответствует поверхности зоны полного насыщения) в виде регулярной сетки ее высотных отметок (растровая поверхность). Мощность зоны аэрации вычислялась путем вычитания полученной поверхности из дневной поверхности (верхняя граница зоны аэрации), в качестве которой использовалась цифровая модель рельефа (ЦМР). Интерполяция и вычитание растровых поверхностей производились в программном пакете ArcGIS 10 с использованием модуля Spatial Analyst.

Разделение разреза зоны аэрации на литологические единицы в пределах

оцениваемого района весьма проблематично. Прежде всего, это связано с тем, что район довольно слабо и неравномерно обеспечен данными бурения. Наряду с чрезвычайной сложностью геологического строения массива это не позволяет проводить оценку фактора  $O_I$  по отдельным литолого-стратиграфическим единицам в пределах толщи зоны аэрации, что предусматривается методикой оценки. В таком случае приходится производить оценку по литологии пород, выходящих на поверхность, с допущением их выдержанности по всему разрезу до нижней границы зоны аэрации.

На рабочей карте состава горных пород были выделены участки с закарстованными породами. Их выделение проводилось как по поверхностным карстовым формам рельефа (на основе анализа ЦМР), так и по подземным, представленным карстовыми полостями (на основе материалов Кадастра пещер Крыма).

Участок поля Бештекне, в пределах которого на поверхность из-под водоносных верхнеюрских отложений выходят водоупорные отложения средней юры, был оценен как «дыра» в зоне аэрации с присвоением ему нулевого балла.

Итоговая карта оценки фактора “ $O_L$ ” представлена на рисунке 4.6, секция Б.

*Эпикарст и подпочвенный слой ( $O_e$ ).*

Оценка мощности эпикарста – главного показателя оценки фактора “ $O_e$ ” – производилась с использованием разработанной нами оригинальной методики, описанной и апробированной в работе (Климчук и др., 2009). В основе методики используется геоморфологический подход. Согласно ей, главным критерием картирования мощности эпикарстовой зоны является распределение глубин карстовых воронок. Днища воронок примерно соответствуют нижней границе эпикарстовой зоны. Таким образом, ее минимальная мощность может оцениваться по глубине воронок, измеряемой от условной бровки – перегиба профиля пологой поверхности плато. Необходимо отметить, что данная методика применима только в случае открытого и, с определенной оглядкой, раскрытого типов карста на зрелых стадиях его эволюции. Глубины воронок определялись по спутниковым моделям рельефа, крупномасштабным топографическим картам и уточнялись полевыми наблюдениями.

На участках с карстующимися породами, где воронки отсутствуют, мощность эпикарста определялась по наблюдениям в шурфах, зачистках, естественных обнажениях закарстованных пород, верхних частях близповерхностных карстовых пещер. Кроме того, отдельно картировались участки вдоль тектонических разрывов, где отмечается увеличение мощности эпикарстовой зоны до 10 и более метров.

Для получения карты распределения мощности эпикарста производилась интерполяция между установленными точками. При интерполяции использовался метод

обратно взвешенных расстояний в модуле Spatial Analyst программного пакета ArcGIS 10. Полученная регулярная сетка распределения мощности эпикарста классифицировалась по установленной в методике схеме. Далее производилась векторизация классифицированного растра с выделением участков с различными оценочными баллами в виде отдельных полигонов. Мелкие участки (с площадью менее 1 га) были объединены с соседними полигонами по принципу наибольшей общей границы. На полученную мозаику участков были наложены буферные зоны тектонических разрывов шириной, соответствующей их порядку (от 50 до 150 м) с присвоением им балла 3. Днища крупных котловин, участки экстремальной закарстованности (рис. 4.8) и плотности воронок (более 60 воронок на км<sup>2</sup>) характеризуются практически полным отсутствием эпикарста («дыры» в эпикарсте) и, поэтому, оценивались нулевым баллом.

В целях верификации полученных результатов оценки фактора «Ое» использовался метод георадарного профилирования (см. п. 2.3.3). Сопоставляя результаты интерпретации георадарного профилирования с распределением мощностей эпикарста, полученным по вышеописанной методике, был сделан вывод о достаточно высокой достоверности результатов выполненной оценки фактора «Ое».



Рис. 4.8. Участок экстремальной закарстованности на плато Ай-Петри с «перфорированным» эпикарстом.

На участках оцениваемой территории, где на поверхность выходят слабо карстующиеся и некарстующиеся породы (глины, песчаники, аргиллиты), эпикарст априори отсутствует. Аналогом эпикарста в этих случаях выступает подпочвенный горизонт, сложенный продуктами выветривания коренных пород. Поэтому оценка фактора “Ое” в пределах таких участках проводилась по литологическому принципу, согласно предложенной в методике схеме.

Итоговая карта оценки фактора “Ое” представлена на рисунке 4.6, секция В.

Итоговая карта О-индекса получена путем наложения друг на друга карт “Os”, “Ol” и “Ое” с суммированием баллов по этим факторам. Весь диапазон полученных таким образом значений О-индекса был разделен на 5 категорий, соответствующих различным уровням защищенности. Итоговая карта О-индекса представлена на рисунке 4.9. Распределение категорий защищенности по занимаемой ими площади представлено в таблице 4.1.

Анализируя полученное распределение различных категорий защищенности, можно сделать следующие выводы. Участки с высокой и очень высокой защищенностью соответствуют площадям, сложенным слабопроницаемыми породами с мощным или среднемощным почвенным покровом. К ним относятся юго-восточная Приайпетринская крупнохолмистая гряда, Прибеденекрырская котловина, верховья рек Алмалык, Куру-Узень, Узунджа, Бага, Боса, Календа. Низкой и очень низкой защищенностью характеризуются участки, сложенные хорошо карстующимися породами, с маломощным почвенным покровом либо его отсутствием. Это, например, каньоны рек Узунджа, Аузун-Узень, обрывистые участки на северном и южном склоне массива, южная часть плато с интенсивной закарстованностью, возвышенности Бедене-Кыр, Карадаг, Биюк-Синор, Кучук-Синор.

Таблица 4.1. Площадное распределение категорий защищенности подземных вод покровами (О-индекс) в пределах оцениваемой территории

№ п/п	Категория защищенности	Площадь, км <sup>2</sup>	Площадь, %
1	Очень низкая	9,64	4,1
2	Низкая	71,81	30,3
3	Средняя	61,72	26,0
4	Высокая	70,45	29,8
5	Очень высокая	23,38	9,8

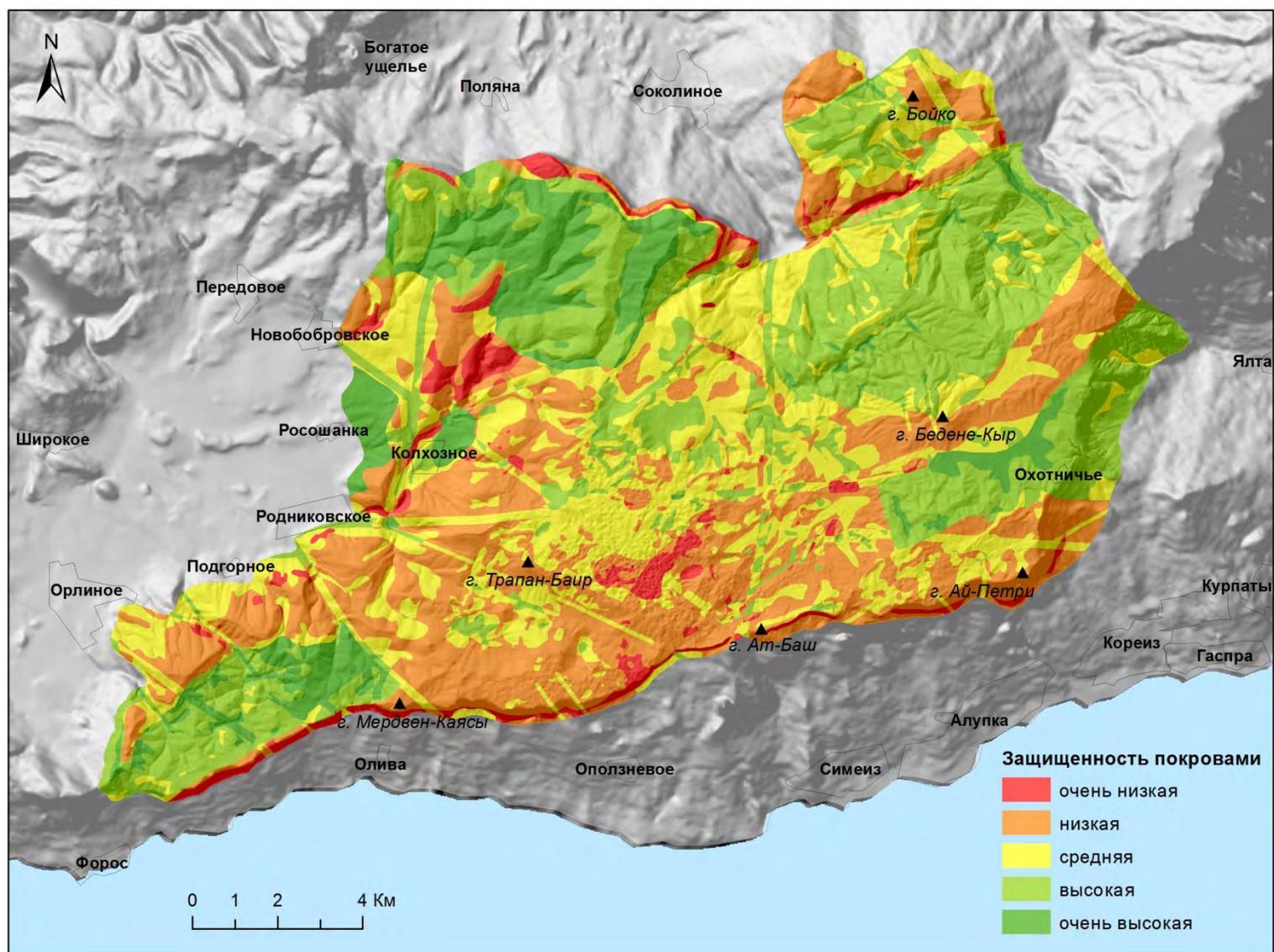


Рис. 4.9. Карта категорий защищенности ПВ Ай-Петринского массива покровными отложениями (О-индекс).

***С-индекс (снижение защищенности за счет факторов концентрации стока)***

*Русловой сток и инфлюация (Crb).*

Для оценки данного фактора необходим следующий набор геоданных:

- линейные объекты, соответствующие руслам водотоков и тальвегам балок временного стока (овражно-балочная сеть);
- очаги линейной инфлюации в руслах водотоков, в местах их пересечения с зонами тектонической трещиноватости;
- линии тальвегов периодических водотоков, замыкающихся на поноры.

Линии тальвегов постоянных и временных водотоков были сняты с крупномасштабных топографических карт. Участки линейной инфлюации были выявлены наложением линий водотоков на геолого-структурную основу, в результате чего были определены места пересечения руслами водотоков линий тектонических разрывов. Многие из этих участков описаны в литературе (Дублянский, Кикнадзе, 1984, Шутов, 1971). Точечные поглотители стока периодических водотоков определялись в ходе полевых маршрутных наблюдений. Таким образом, было установлено более десятка периодически активных поноров. Некоторые поглотители были обнаружены по данным кадастра карстовых полостей Крыма: полости, обозначенные в кадастре как пещеры-поноры. Результат оценки фактора представлен на рисунке 4.10, секция А.

*Уклон и растительность (Csv).*

В качестве основы для вычисления уклонов поверхности использовалась цифровая модель рельефа с разрешением 5 м, упомянутая выше. С помощью инструмента «Slope» в расширении Spatial Analyst был построен растр уклонов с разрешением, аналогичным исходной ЦМР. Полученный растр был классифицирован согласно принятому в методике ранжированию и преобразован в векторный формат.

Разделение территории по характеру проницаемости залегающих с поверхности пород производилось на основе геологических карт района (Геологическая карта..., 1984), ЦМР и полевых наблюдений. К участкам с проницаемыми породами отнесены территории, сложенные известняками верхней юры (Яйлинская и Ялтинская свиты) с наличием поверхностных и подземных карстопроявлений. На остальной территории на поверхность выходят слабопроницаемые породы, представленные глинистыми и песчанистыми разностями известняков верхней юры (свита Деймен-Дере, Беденекырская и, частично, Ялтинская и Яйлинская свиты), терригенными отложениями нижнего мела (свита Бечку и Новобобровская толща) и средней юры (Ай-Васильская свита).

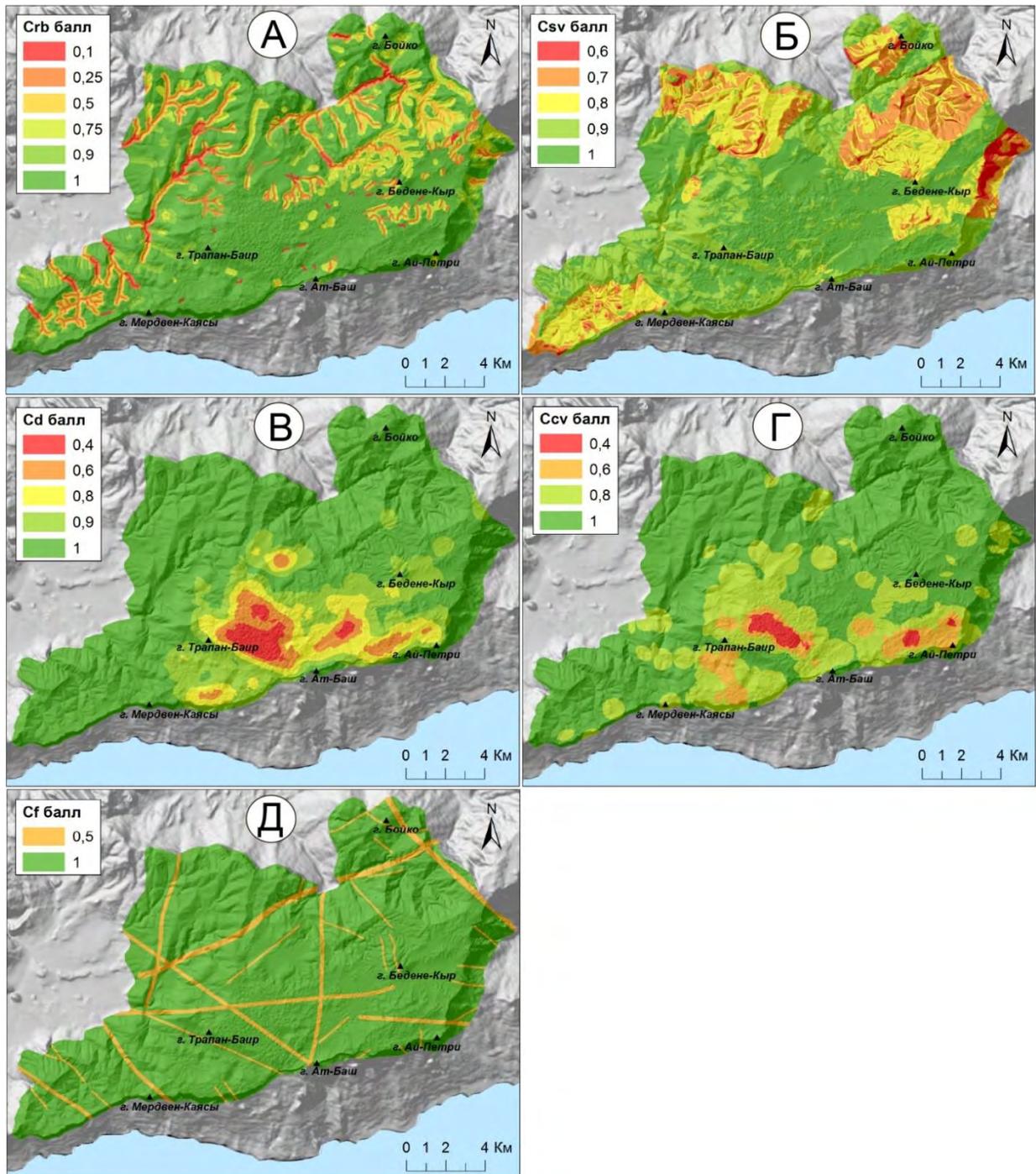


Рис. 4.10. Результаты оценки факторов снижения защищенности ПВ за счет концентрации стока (факторы группы “С”): А – русловой сток и инфлюация (Crb), Б – уклон и растительность (Csv), В – очаговая инфильтрация в карстовых воронках (Cd), Г – концентрация подземного стока карстовыми полостями (Ccv), Д – концентрация подземного стока разломными нарушениями (Cf).

Растительность картировалась по космическим снимкам Google высокого разрешения, снятым в различные сезоны года, с их наложением на ЦМР. Достоверность границ полученных выделов подтверждалась полевыми наблюдениями.

Полученные векторные слои уклонов и растительности объединялись наложением – отдельно для территорий с проницаемыми и территорий со слабопроницаемыми породами. После калькуляции баллов “Csv” производилось их слияние в один слой. Результат оценки представлен на рисунке 4.10, секция Б.

*Очаговая инфильтрация в карстовых воронках (Cd).*

Расположение и морфометрия воронок снимались с крупномасштабных топографических карт. Полученная информация была организована в виде точечного слоя с атрибутом глубины. Всего было идентифицировано 1552 воронки с глубинами от 2 до 37 м (максимальная - котловина Осинник). Подавляющее большинство воронок (1400) имеет глубины 10 и менее м. Лишь 12 воронок характеризуются глубиной более 20 м.

Точкам воронок в соответствии с их глубиной был присвоен весовой коэффициент. По ним с использованием инструмента «Point Density» был построен растр плотности воронок с учетом весовых коэффициентов. Плотность вычислялась по круговой окрестности с радиусом 564 м (радиус круга с площадью 1 км<sup>2</sup>). Полученный растр был классифицирован в соответствии со схемой по методике и переведен в векторный полигональный слой с присвоением полигонам балла “Cd”. Результат оценки представлен на рисунке 4.10, секция В.

*Концентрация подземного стока карстовыми полостями (Ccv).*

При оценке фактора использовалась информация из Кадастра карстовых полостей Крыма, а именно, координаты входов полостей и параметр их глубин. Всего было учтено 426 полостей, расположенных в пределах района оценки и в ближайшей окрестности его границ. Из общего числа учтенных полостей 388 имеют глубину до 50 м включительно. Глубиной более 100 м характеризуются всего 7 пещер.

Оценка фактора производилась по процедуре аналогично описанной выше для фактора “Cd”. Результат представлен на рисунке 4.10, секция Г.

*Концентрация подземного стока разломными нарушениями (Cf).*

Информация о разломных нарушениях была заимствована из геологических карт (Геологическая карта, 1984). К учету были приняты только достоверные нарушения, подтвержденные геофизическими, карстолого-геоморфологическими, спелеологическими данными. К нарушениям первого порядка отнесены главные разломы глубокого заложения и протяженностью до 60 км. К оцениваемому району относятся два таких нарушения: Краевой взброс и Ялтинский сбросо-сдвиг (Геологическая карта..., 1984). Нарушения второго порядка представлены межблоковыми разрывами со средней длиной около 20 км. К нарушениям третьего порядка относятся мелкие внутриблоковые разрывы протяженностью 1-14 км. Расположение и порядок принятых к учету нарушений показаны

на рабочей структурно-геологической карте (рис. 4.7).

Выбранные разломные нарушения были оцифрованы в виде векторных линейных объектов с атрибутом порядка разломов. Для полученных объектов с помощью стандартного инструмента в модуле ArcMap были построены буферные зоны шириной, соответствующей порядку разломов. Буферным зонам был присвоен балл  $C_f=0,5$ ; остальной территории присвоен балл  $C_f=1$ . Результат оценки представлен на рисунке 4.10, секция Д.

Итоговая карта С-индекса получена путем наложения слоев “Crb”, “Csv”, “Cd”, “Ccv” и “Cf” с перемножением баллов по этим факторам. Таким образом, все значения С-индекса находятся в диапазоне от 0 до 1. Этот диапазон был разделен на 5 категорий, соответствующих различным уровням снижения защищенности. Итоговая карта С-индекса представлена на рисунке 4.11. Распределение категорий защищенности по занимаемой ими площади представлено в таблице 4.2.

Анализ карты полученной карты С-индекса позволяет выявить следующие закономерности распределения участков с различной степенью снижения защищенности. Участки с высокой и очень высокой степенью снижения защищенности занимают соответственно 15,4% и 7,1% от общей площади района оценки. К ним относятся, прежде всего, прирусловые участки крупных эрозионных и карстово-эрозионных форм рельефа: долин, балок, каньонов. В частности, максимальное снижение защищенности характерно для прирусловых зон на слабопроницаемом и слабокарстующемся основании. К ним относятся верховья водотоков Узунджа, Алмалык, Бага, Куру-Узень, Календа, Боса и другие. Большая часть русел этих водотоков в среднем течении пересекаются крупными тектоническими разрывами, что ведет к линейной инфлюации сосредоточенных в них вод и, как следствие, к экстремальному снижению защищенности подземных вод в этих зонах. Высоким снижением защищенности характеризуются области высокой поверхностной и подземной закарстованности, сосредоточенные преимущественно в центральной части плато Ай-Петри, а также линейные зоны тектонических разрывов. При наложении зон высокой закарстованности и приразрывных зон друг на друга категория снижения защищенности изменяется на очень высокую. К категории экстремального снижения защищенности также отнесены участки русел периодических водотоков на плато, замыкающихся на поноры-поглотители. Как правило, они начинаются на холмистых возвышенностях и грядах в пределах плато, сложенных слабокарстующимися породами: мергелистыми и песчанистыми известняками.

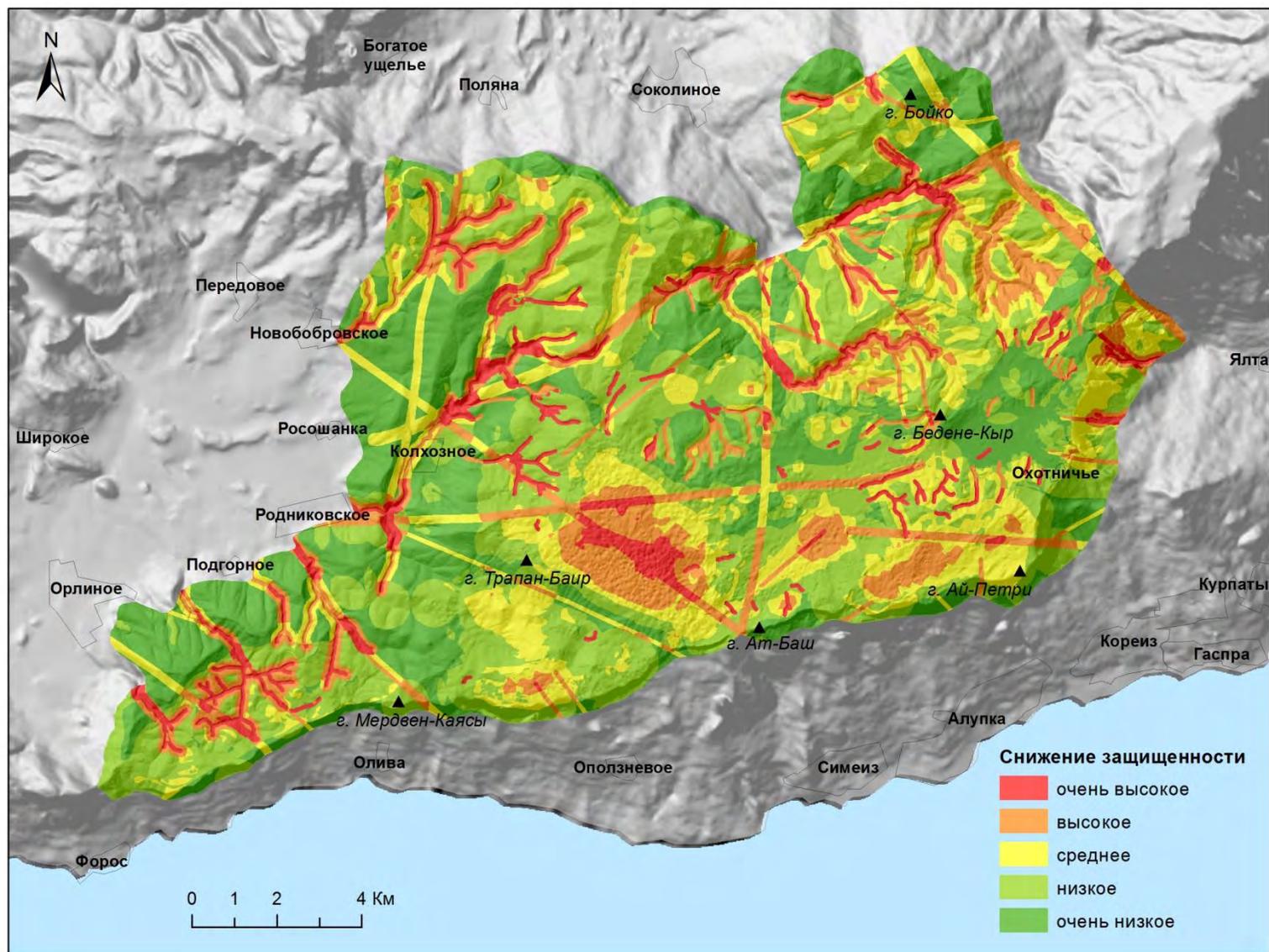


Рис. 4.11. Карта категорий снижения защищенности ПВ Ай-Петринского массива за счет факторов концентрации стока (С-индекс).

Таблица 4.2. Площадное распределение категорий снижения защищенности подземных вод за счет факторов концентрации стока (С-индекс) в пределах оцениваемой территории

№ п/п	Категория снижения защищенности	Площадь, км <sup>2</sup>	Площадь, %
1	Очень высокое	16,73	7,1
2	Высокое	36,48	15,4
3	Среднее	46,23	19,5
4	Низкое	79,00	33,3
5	Очень низкое	58,72	24,7

Участки с низкой и очень низкой защищенностью занимают соответственно 33,3% и 24,7% от площади оцениваемой территории, что в сумме составляет чуть менее 50 %. На плато к ним относятся пологие, зачастую котловинообразные участки с отсутствием поверхностных и подземных карстопроявлений. На склонах массива низкой степенью снижения защищенности характеризуются участки различной крутизны с низкой степенью эрозионной расчлененности. При этом наиболее низкая степень концентрации стока характерна для участков с проницаемым основанием, сложенных закарстованными известняками, но лишенных значительных карстопроявлений. Закарстованность здесь прежде всего проявляется в хорошо развитой зоне эпикарста, что и обуславливает высокую проницаемость пород.

***Р-индекс (снижение защищенности за счет режима осадков)***

Для оценки данного фактора необходима информация о суточных количествах осадков и высоте снега за многолетний период. На настоящий момент актуальными данными по этим показателям в пределах оценочного района обладает только одна точка – метеостанция Ай-Петри. Отсутствие других станций и постов метеонаблюдений на массиве либо в его непосредственной близости лишает возможности дифференцировать оцениваемую территорию по Р-индексу. С другой стороны, район оценки имеет относительно небольшую площадь, в пределах которой существенных различий в режиме осадков, которые могли бы повлиять на результат оценки, не предполагается. Таким образом, одной метеостанции, пускай и не с самым репрезентативным местоположением, в данном случае может быть достаточно для оценки Р-индекса на всю площадь тестового района. Учет данного индекса в процедуре оценки может существенным образом повлиять на конечное распределение категорий уязвимости ПВ. В случае его «опускания»

может произойти недооценка уязвимости, что является крайне нежелательным. К тому же, учет данного индекса, даже в таком крайне генерализированном виде, важен для сравнения результатов оценки УПВ между районами Горного Крыма, существенно отличающимися по количеству и режиму осадков (например, массивы Ай-Петри и Караби). Поэтому было принято решение не убирать данный фактор из оценочной процедуры, а определить общий Р-индекс для всей оцениваемой территории.

Для оценки данного фактора использовались детальные данные метеонаблюдений по станции Ай-Петри за период 2005-2017 гг. Использованные данные взяты из сети Интернет, где они находятся в открытом доступе на сайте «Расписание погоды» (rp5.ru). Среднее годовое количество дней с дождевыми осадками 20-80 мм и стаиванием снега на 10-20 см (показатель “Prd”) за этот период составило 10,4. Среднее годовое количество дней с экстремальными осадками и снеготаянием (показатель “Pse”) составило 0,5. Таким образом, согласно оценочной схеме в используемой методике, итоговый Р-индекс имеет значение 0,9.

#### ***Уязвимость ресурса подземных вод***

Итоговая карта собственной уязвимости подземных вод Ай-Петринского массива получена посредством наложения карт индексов “О”, “С” и “Р”. Комплексный балл уязвимости вычислен перемножением перечисленных индексов в таблице атрибутов полученного векторного слоя. Далее на основании вычисленного балла все полигоны слоя были классифицированы на 5 категорий уязвимости. Итоговый результат оценки представлен на рисунке 4.12.

Распределение категорий уязвимости по площадям дано в таблице 4.3. Категории «высокой» и «очень высокой» уязвимости занимают соответственно 18,6 % и 7,1 % от площади оцениваемого района. Распределение участков данной категории по большей части унаследовано от карты “С”, что связано с высокой ролью факторов концентрации стока в формировании уязвимости ПВ. Наибольшую площадь занимает категория «средней» уязвимости – около 42 %. Значительную площадь занимает категория «низкой уязвимости» – около 30 %. Ей соответствуют участки с мощным слабопроницаемым покровом и низкой степенью локализации поверхностного стока, находящиеся, как правило, на значительном расстоянии выше закарстованных территорий. Сюда же относятся и участки на склонах и плато массива, сложенные проницаемыми карбонатными породами, с отсутствием карстопроявлений и условий концентрации стока. Категория «очень низкой» уязвимости занимает всего 2 % территории Ай-Петринского массива.

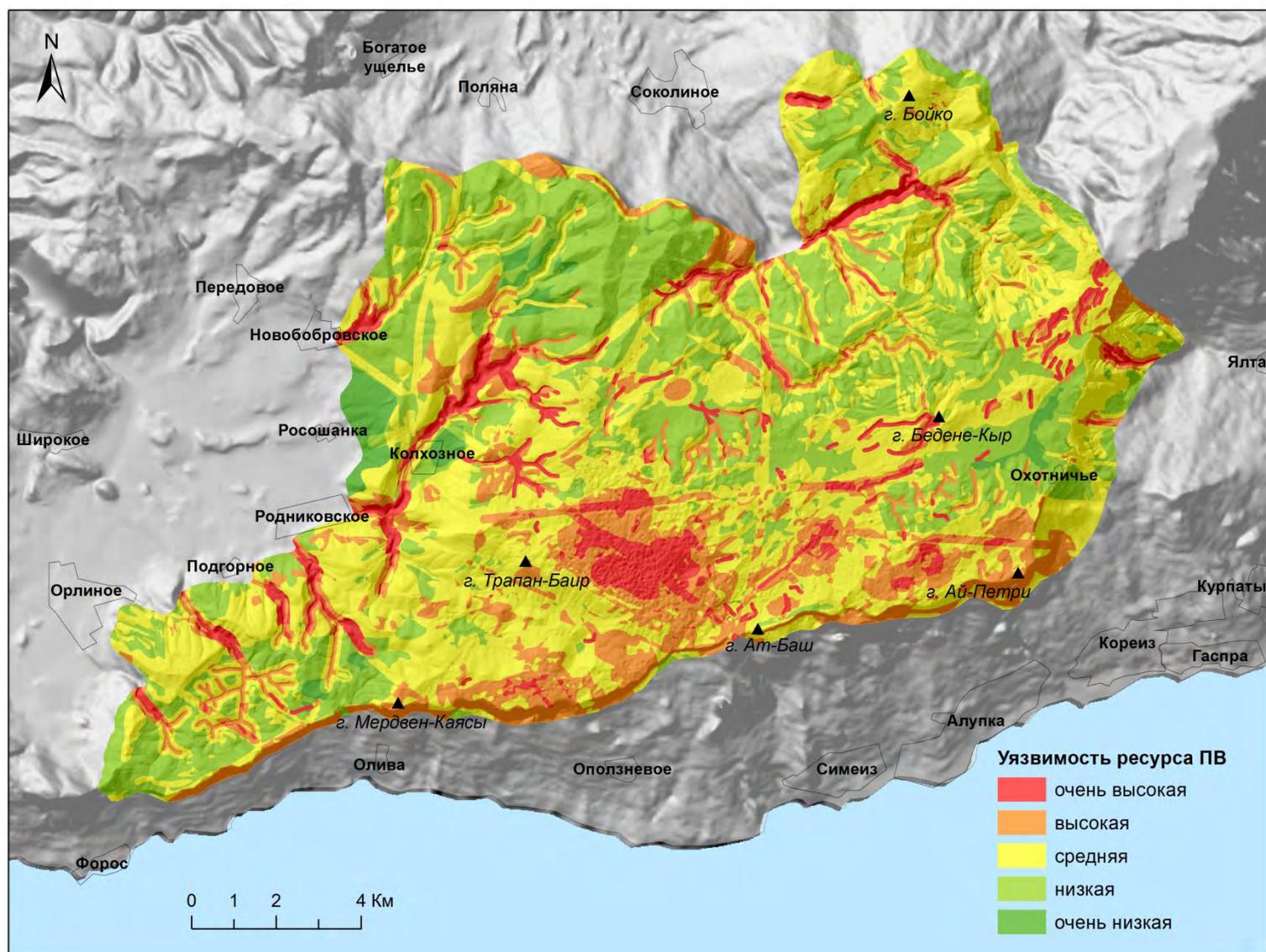


Рис. 4.12. Итоговая карта уязвимости ресурса ПВ Ай-Петринского массива, полученная на основе Горно-Крымской методики.

Таблица 4.3. Площадное распределение категорий собственной уязвимости ПВ к загрязнению в пределах оцениваемой территории, полученное на основе Горно-Крымской методики оценки УПВ

№ п/п	Категория уязвимости	Площадь, км <sup>2</sup>	Площадь, %
1	Очень высокая	16,86	7,1
2	Высокая	43,99	18,6
3	Средняя	99,88	42,1
4	Низкая	71,70	30,2
5	Очень низкая	4,80	2,0

#### ***Уязвимость подземных вод на выходе (полная уязвимость)***

Оценка уязвимости подземных вод на выходе (или полной уязвимости) проводится с учетом параметров стока в зоне полного насыщения. Согласно принятой методике данные параметры оцениваются посредством индекса “К”, который вычисляется с учетом ряда факторов. К ним относятся характер связи выхода ПВ с отдельными частями области питания, развитость каналовой проницаемости в зоне полного насыщения и время достижения потенциальными загрязнителями выхода ПВ (рис. 4.1). Для оценки данных факторов необходима следующая информация:

- границы области питания выхода ПВ с ее дифференциацией по удаленности, характеру связи и степени участия в формировании стока данного выхода ПВ;
- тип преобладающей проницаемости (каналовая, трещинная, смешанная) и степень развития каналовой проницаемости;
- скорости движения подземных вод от различных частей области питания к точке разгрузки (водозабора).

Для получения этой информации используются различные методы: балансовый, индикаторный, спелеологический, гидрометрический, изотопный, гидрохимический, гидрогеологический (эксперименты по откачкам и наливкам в скважинах), геофизический, метод горных проходок. Наиболее информативным и, в то же время, простым методом решения перечисленных задач в условиях карста является индикаторный метод, в частности, эксперименты с использованием флуоресцентных красителей (мультитрассирование).

На Ай-Петринском массиве было проведено около десятка трассерных экспериментов – все в 60-70-е гг. прошлого столетия. Их результаты в общих чертах выявили основные направления подземного стока массива и определили примерные скорости движения карстовых вод, но, в то же время, оставили нерешенными много вопросов региональной гидрогеологии

Ай-Петри. Во всех экспериментах использовался один краситель – флуоресцеин (или его натриевая соль – уранин), что существенно ограничивает информативность результатов. Кроме того, использование одного и того же красителя в многочисленных экспериментах, проводимых в течение около 10 лет на одном массиве, с большой вероятностью могло привести к ошибочным результатам. Такая высокая частота и пространственная плотность запуска флуоресцеина, да еще в избыточно большом количестве, несомненно, должна была привести к загрязнению массива этим красителем на долгое время (до 10 и более лет), что ставит под сомнение правомерность проведения более поздних экспериментов и достоверность полученных в них результатов. Тем не менее, за отсутствием других данных, на настоящее время они представляются единственной основой для оценки уязвимости ПВ на выходе.

В качестве объекта оценки выбран источник Хаста-Баш – крупнейший источник на южном склоне массива, выходящий у его подножья под вершиной г. Ай-Петри. Он характеризуется довольно длительным рядом режимных гидрометрических и гидрохимических наблюдений (1970-1999 гг.). Средний многолетний расход источника, полученный за этот период, составил 223 л/с. По своему режиму это типичный карстовый источник флюационного типа с высокой изменчивостью расхода, напрямую зависящего от гидрометеорологических событий в области его питания. Максимальный расход за указанный период наблюдений достигал 4 033 л/с, минимальный падал до 20 л/с.

Результаты прошлых экспериментов по трассированию выявили связь источника Хаста-Баш с некоторыми точками в пределах плато, что позволяет наметить примерные границы области его питания. Позитивными в отношении данного источника оказались два эксперимента, проведенных Ялтинской гидрогеологической и инженерно-геологической партией (Дублянский, 1977, Дублянский, Кикнадзе, 1984). Первый из них проводился в марте 1975 г., когда на фоне активного снеготаяния в понор-поглотитель Яузлар, расположенный у северо-восточной границы Ай-Петринской яйлы, было запущено 10 кг флуоресцеина. Наблюдения за его выходом велось в 16 пунктах с помощью ловушек. Выход красителя зафиксирован в 7 пунктах, среди которых и Хаста-Баш, в котором, впрочем, отмечалась низкая интенсивность окрашивания. Кроме него позитивный результат с более концентрированным выходом красителя дали другие источники, расположенные как на южном склоне массива (рис. 4.27), так и на северном (источники Пания и Карстовый). Поразительно, что краситель через 5 суток также был обнаружен в Скульском источнике, находящемся в противоположной части массива на расстоянии 24 км от места запуска. В Хаста-Баше краситель был зафиксирован также спустя 4 суток после запуска. С учетом низкой частоты смены ловушек (раз в 3-4 суток) дохождение красителя могло произойти несколько раньше. Таким образом, выявленная скорость движения вод к источнику составила минимум 2,5 км в сутки. Примечательно, что

данный эксперимент был повторен в октябре того же года в условиях глубокой межени и по его итогу краситель был обнаружен только в источниках северного склона массива. Таким образом, выявленный в ходе первого эксперимента широкий разнос красителя, при условии достоверности полученных результатов, указывает на то, что в условиях высокого уровня КПВ водосборные площади отдельных источников и КВС расширяют свои границы, по сравнению с маловодным периодом, с их пересечением и наложением друг на друга.

Второй эксперимент с выходом красителя в источнике Хаста-Баш был проведен в ноябре 1977 г. 8 кг флуоресцеина было запущено в подземный водоток в глубочайшей пещере массива Каскадной на глубине около 300 м, то есть, практически во фреатической зоне. Концентрированный выход красителя в Хаста-Баше наблюдался уже спустя 6 часов после запуска, что говорит о высокой канализованности подземного стока на этом участке. С учетом расстояния напрямую от места запуска к источнику в 4,6 км скорость движения вод составила 0,77 км/час.

Важную информацию для установления площади области питания дают водно-балансовые расчеты. Исходными данными могут служить многолетние гидрометрические наблюдения за источником и многолетние гидрометеорологические наблюдения в предполагаемой области его питания. Согласно данным балансовых наблюдений, проводимых на плато Ай-Петри в 1958-1964 гг. (Дублянский, Кикнадзе, 1984), величина инфильтрационного питания для почв мощностью до 10 см составляет 830 мм/год, до 30 см – 721 мм/год, до 50 см – 660 мм/год. Учитывая, что на Ай-Петри существенно преобладают почвы мощностью 10-30 см, а площади с почвами меньшей и большей мощности примерно равны, для балансовых расчетов принимаем среднюю величину инфильтрационного питания 721 мм/год. С учетом среднемноголетнего расхода источника Хаста-Баш 223 л/с балансовые расчеты дают площадь водосбора 9,75 км<sup>2</sup>.

На основании результатов индикаторных экспериментов и проведенных балансовых расчетов можно примерно оконтурить область питания источника с ее дифференциацией на зоны, играющие различную роль в формировании стока Хаста-Баша (рис. 4.13). Границы между зонами проведены по орографическому принципу с учетом геолого-гидрогеологических данных района. Внутренняя область питания, где формируется основная часть стока источника, лежит в границах Приайпетринской котловины площадью 6 км<sup>2</sup>. Она также захватывает обрывистые склоны под г. Ай-Петри. Очевидно, эта зона имеет прямую гидравлическую связь с источником посредством хорошо развитой каналовой проницаемости. Удаленная от источника крайняя северо-восточная часть Ай-Петринской яйлы также имеет гидравлическую связь с источником, однако она проявляется лишь временно, в периоды высокого уровня вод. Лишь незначительная часть стока, формирующегося на этом участке, идет на питание Хаста-Баша,

большой своей частью уходя к источникам северного склона массива. Следовательно, этот участок следует отнести к внешней области питания рассматриваемого источника. Между внутренней и внешней областью питания выделена промежуточная зона. К ней отнесены Юго-Восточная Приайпетринская крупнохолмистая гряда и Восточно-Айпетринская котловина (топонимика согласно Б.Н. Иванову (1958)).

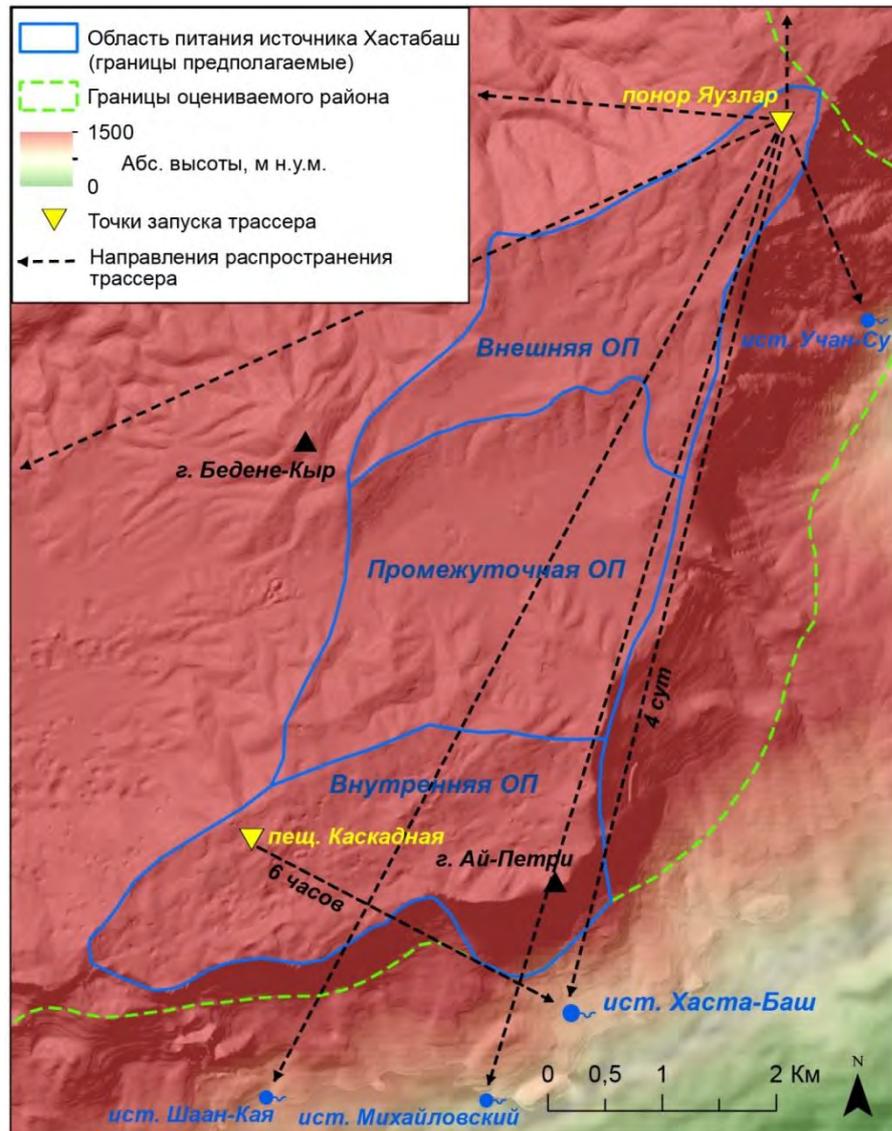


Рис. 4.13. Рабочая схема подземного стока карстовых вод юго-восточной части Ай-Петринского массива. Показаны предполагаемые границы области питания источника Хаста-Баш с ее разделением на внутреннюю, внешнюю и промежуточную зоны.

Таким образом, имеющихся данных об условиях подземного стока в насыщенной зоне юго-восточной части Ай-Петринского массива может быть достаточно для проведения приблизительной оценки К-индекса и, как следствие, полной уязвимости ПВ источника Хаста-Баш. Посредством изучения и анализа исходных данных для каждой из зон области питания

был вычислен К-индекс, согласно схеме (рис. 3.1). Полученные его значения составили «0», «1» и «2» соответственно для внутренней, промежуточной и внешней зон области питания. Далее полученная карта К-индекса была пересечена с картой уязвимости ресурса ПВ с вычислением итогового индекса уязвимости выхода ПВ. Полученное распределение классов уязвимости вод источника Хаста-Баш представлено на рисунке 4.14.

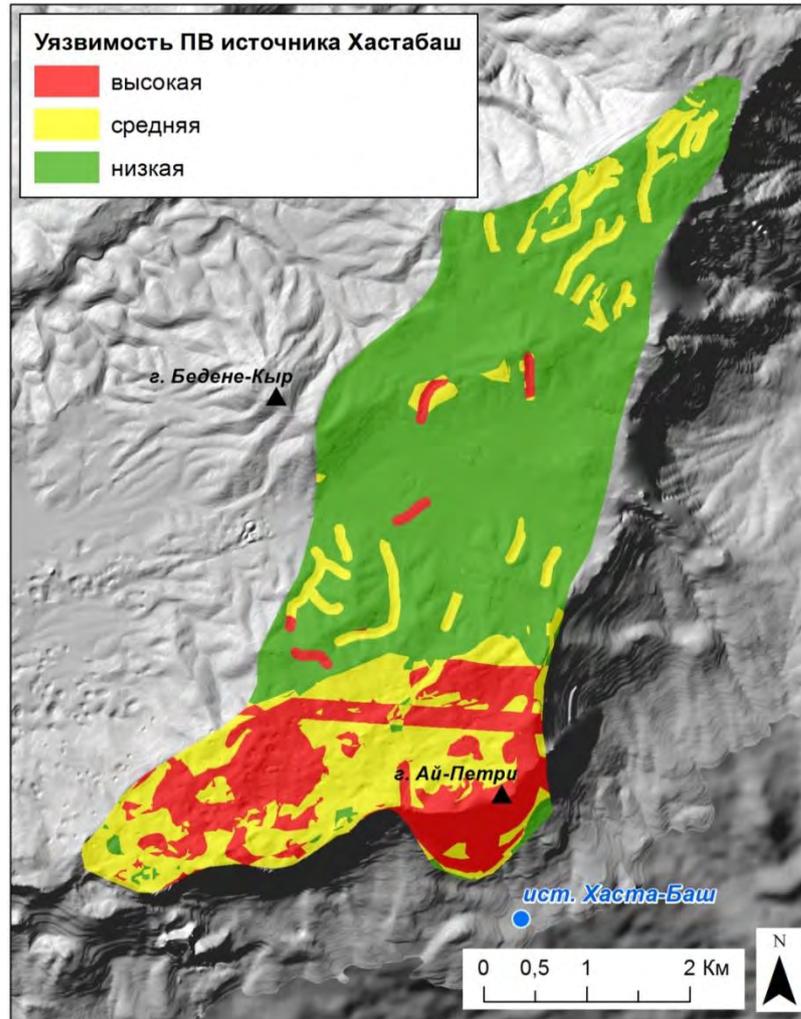


Рис. 4.14. Карта полной уязвимости подземных вод источника Хаста-Баш, полученная на основе Горно-Крымской методики.

Согласно полученным результатам, наибольшая концентрация участков с высоким классом уязвимости находится в пределах внутренней зоны области питания оцениваемой КВС. К ним относятся участки с высокой степенью поверхностной и подземной закарстованности, приразломные зоны и участки обнажения горных пород. Практически вся остальная часть данной зоны относится к среднему классу уязвимости. Преобладающая часть двух остальных зон имеет низкую степень уязвимости. Исключением здесь являются балки периодических водотоков, поглощаемых понорами, которые попали в классы средней и высокой уязвимости.

При этом, высокую степень уязвимости имеют лишь несколько балок, находящихся в промежуточной области питания.

Для более точной оценки уязвимости выхода ПВ необходимы эксперименты с использованием одновременно нескольких индикаторов (мультитрассирование). Это позволит произвести более детальную дифференциацию территории по гидрогеологическим условиям и уточнить водосборные площади для отдельных выходов ПВ.

#### ***Анализ чувствительности результатов оценки уязвимости к отдельным факторам***

Для определения веса отдельных факторов в формировании итогового индекса уязвимости проводят специальный анализ - анализ чувствительности оценки уязвимости к факторам. Для Горно-Крымского подхода применим один из видов данного анализа, осуществляемый посредством устранения отдельных факторов из системы расчета индекса уязвимости. Такой анализ ранее выполнялся в работах по оценке уязвимости подземных вод с использованием метода DRASTIC (Babiker et al, 2005 , Mimi et al, 2011). Для этого в указанных работах применялась формула:

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

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.

В случае Горно-Крымской методики предложенная формула расчета индекса чувствительности в этом виде очевидно не вполне приемлема. Это связано с тем, что согласно подходу факторы уязвимости относятся к двум группам: факторы защищенности покровами (группа “О”) и факторы снижения защищенности (группа “С”). Отметим, что факторы группы “Р” при данном анализе не рассматривались в связи с недостаточностью данных об их изменчивости в пределах района оценки. Факторы первой группы в своей сумме образуют индекс защищенности (О-индекс), а факторы второй группы понижают этот индекс, так как схема оценки регламентирует его умножение на произведение индексов, варьирующих от 0,1 до 1 (С-индекс). Таким образом, итоговый индекс защищенности всегда будет меньше либо равен О-индексу. Факторы группы «О» «играют» на увеличение итогового индекса уязвимости, а факторы группы “С” могут его изменить только в сторону понижения. В связи с этим, сопоставлять напрямую вес факторов, относящихся к разным группам, по показателю S согласно предложенной формуле не представляется корректным. Очевидно, что показатели S для факторов группы “О” должны быть несколько выше аналогичного показателя для факторов группы “С”. Тем не менее, видится смысл в сопоставлении индексов чувствительности между

факторами, относящимися к одной группе.

Для вычисления индекса чувствительности было решено использовать несколько упрощенную формулу в сравнении с вариантом, предложенным И. Бабикиром с соавторами (Babiker et al, 2005). Адаптированный нами вариант формулы имеет вид:

$$S = \frac{|V - V'|}{V} \times 100$$

В данном случае под индексом уязвимости ( $V$  и  $V'$ ) понимается произведение индексов “O” и “C”.

По итогам вычисления по каждому из факторов были построены матрицы (растры) со стороной ячеек 100 м, каждой из которой присваивался индекс  $S$ . По каждой матрице вычислялись базовые статистические показатели, необходимые для определения меры чувствительности итогового индекса уязвимости к отдельным факторам. Это дает возможность сопоставить веса отдельных факторов при оценке УПВ. Результаты вычислений представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4. Статистические показатели индекса чувствительности  $S$  для различных факторов УКПВ Ай-Петринского массива

Фактор	$S$ среднее	$S$ максимальное	Стандартное отклонение $S$
Os	8,8	71,0	14,4
Ol	<b>20,1</b>	83,3	24,7
Oe	<b>15,1</b>	77,8	19,3
Crб	<b>16,4</b>	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

Среднеарифметическое значение показателя  $S$  указывает на общую чувствительность результатов оценки УПВ к каждому из факторов. Оказалось, что из факторов группы “O” итоговый индекс уязвимости наиболее чувствителен к фактору “Ol” (литология зоны аэрации):  $S$  среднее составило 20,1. Этому же фактору соответствует и наибольшее значение показателя « $S$  максимальное» среди остальных факторов данной группы. Несколько меньшую чувствительность УКПВ имеет к фактору “Oe” (эпикарст и подпочвенный горизонт):  $S$  среднее 15,1. Еще менее результат оценки чувствителен к фактору “Os” (почвенный покров):  $S$

среднее 8,8.

Среди факторов группы “С” наибольший вес при оценке УКПВ Ай-Петринского массива, как оказалось, имел фактор руслового стока и инфлюации (С<sub>rb</sub>). Средний индекс чувствительности для этого фактора составил 16,4, что значительно превышает аналогичный показатель по другим факторам группы “С” (табл. 4.4). Для него же характерны и наибольшие значения показателя «S максимальное» - до 928,6. Очевидно, это обусловлено ранжированием индекса “С<sub>rb</sub>”, который имеет наибольший диапазон вариации среди других факторов группы “С”: от 0,1 до 1. Таким образом, в случае присвоения данному фактору индекса 0,1, итоговый индекс уязвимости соответствующего участка сразу же понижается на порядок. Общая чувствительность индекса УКПВ к остальным факторам по показателю «S среднее» понижается в следующем порядке: “С<sub>d</sub>” и “С<sub>cv</sub>” (по 7,0), “С<sub>sv</sub>” (5,9), “С<sub>f</sub>” (4,4).

#### **4.4. Оценка уязвимости карстовых подземных вод массива Ай-Петри с использованием других методов**

Для обоснования выбора разработанного в рамках данной работы Горно-Крымского подхода в качестве наиболее подходящей методики оценки УКПВ в ГК необходимым видится сравнение полученных с его использованием результатов с результатами по другим методикам оценки УКПВ в одном и том же районе. В качестве таковых были выбраны методики ЕРІК и СОР, которые получили наиболее широкое использование в европейских странах в регионах с различными условиями формирования карста. Набор исходных данных для оценки УПВ с этим методиками идентичен использованному при апробации Горно-Крымского подхода.

##### ***Метод ЕРІК***

Несмотря на то, что данный метод, по заявлению его разработчиков (Doerfliger et al., 1999), рекомендован для крупномасштабной оценки, было решено использовать его и для среднемасштабной оценки, для чего картирование факторов уязвимости ПВ пришлось несколько генерализировать. Так, например, при оценке фактора эпикарста “Е” вместо выделения отдельных форм карстового рельефа выделялись участки с их площадным преобладанием над формами другого генезиса, т.е. «некарстового» рельефа. В качестве переходных зон выделялись участки с заметно более низкой плотностью карстовых форм рельефа и так далее. Результаты оценки представлены на рисунке 4.15 и в таблице 4.5.

Характерной особенностью полученных результатов является резкое площадное преобладание категорий очень высокой (около 51 % площади тестового района) и высокой уязвимости (около 35 % площади). Практически вся территория, где наблюдаются хоть какие-либо поверхностные или подземные проявления карста, попала в категорию очень высокой уязвимости. В категорию средней и низкой уязвимости ПВ (соответственно всего около 10 % и

4 % площади района) попали лишь территории, сложенные с поверхности слабопроницаемыми, слабо- или некарстующимися породами.

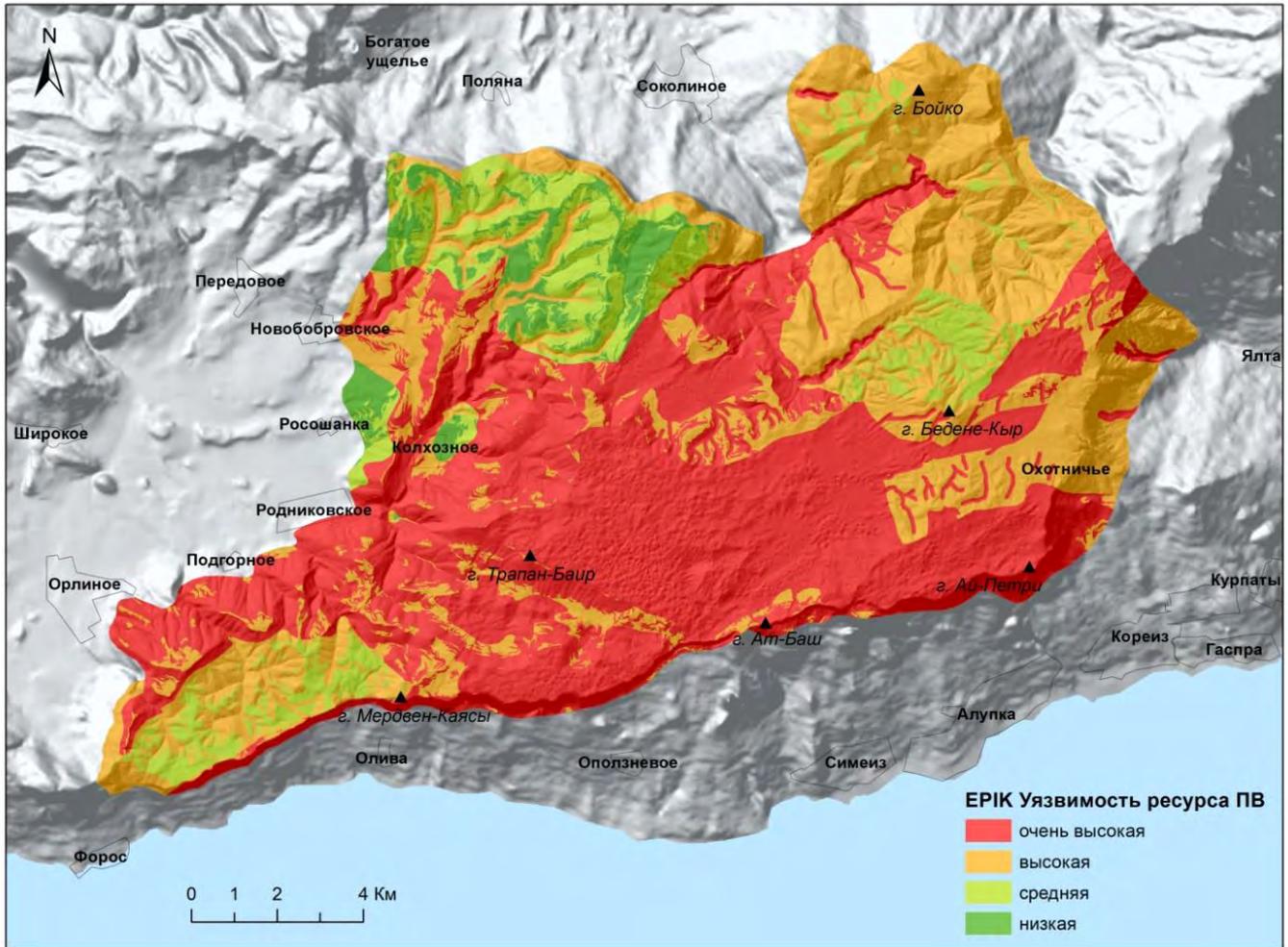


Рис. 4.15. Итоговая карта уязвимости ПВ Ай-Петринского массива, полученная на основе использования метода ЕРИК.

Таблица 4.5. Площадное распределение категорий собственной уязвимости ПВ к загрязнению в пределах Ай-Петринского массива, полученное на основе метода ЕРИК

№ п/п	Категория уязвимости	Площадь, км <sup>2</sup>	Площадь, %
1	Очень высокая	120,16	50,8
2	Высокая	83,20	35,1
3	Средняя	24,47	10,3
4	Низкая	9,00	3,8

Отметим также выявленную связь итогового индекса уязвимости с положением в рельефе. Так, во многих случаях участки на возвышенных элементах рельефа имеют более низкую степень уязвимости, чем смежные с ними участки склоновых и прирусловых местоположений. Как показал анализ, причиной этого являются результаты оценки фактора условий инфильтрации “Г”, которые в данной методике являются очень чувствительными к параметру уклона и поверхностной гидрографии. Минимальный балл, соответствующей наибольшей степени уязвимости, по фактору “Г” получают прирусловые участки, средний балл получают склоновые участки, а максимальный, соответствующий наименьшей степени уязвимости – пологие приводораздельные участки. Кроме того, данному фактору присвоен максимальный среди других факторов весовой коэффициент - «3», что обуславливает его высокое влияние на итоговый результат оценки УПВ.

Основной проблемой, ограничивающей применимость результатов данной оценки, видится слишком большая доля категорий высокой и, особенно, очень высокой уязвимости, которые в случае Ай-Петринского массива вместе составили 86 % от его площади. Очевидно, что в пределах территории, попавшей в категорию очень высокой уязвимости, по факту наблюдаются резкие различия в условиях питания ПВ, а, следовательно, и в возможности их загрязнения, которые на итоговой карте УПВ не получили отражения. Причина этой проблемы объясняется следующим образом. В методике заложен слишком низкий весовой коэффициент фактора защитного покрова “Р” («1») на фоне высоких весов фактора условий инфильтрации “Г” и фактора эпикарста “Е” (по «3»). Очевидно, что фактор защитного покрова оценивается недостаточным образом, который не соответствует его реальной защитной функции. Ко всему прочему, оценка фактора “Е” не учитывает защитных (буферных) свойств эпикарста по отношению к ПВ, постулируя его лишь как фактор, снижающий защищенность ПВ. В итоге, территории с развитым эпикарстом практически во всех случаях попадают в категорию очень высокой уязвимости. В связи с этим, метод ЕРІК представляется неприменимым для других массивов ГК, где практически отсутствуют незакарстованные участки, в том числе и участки со слабопроницаемыми покровами. Как следствие, весь водосбор массива попадает в класс высокой и очень высокой уязвимости. То есть, теряется смысл оценки, который заключается в дифференциации территории по условиям питания ПВ, обуславливающим их уязвимость к загрязнению.

Вероятно, использование метода ЕРІК при оценке и картировании УКПВ в ГК в более крупном масштабе даст более адекватные результаты. Однако для целей картирования уязвимости в избранном масштабе этот метод видится нами малоприменимым.

### ***Метод COP***

Из всех методов оценки УПВ в условиях карста, разработанных на основе базовой

Европейской методологии, COP получил наибольшую популярность. Очевидно, это обусловлено его гибкостью и простотой, так как он не требует детальных исследований и большого массива количественных данных и может обходиться вполне доступными и легко картируемыми данными.

Результаты апробации данного метода на массиве Ай-Петри представлены на рисунке 4.16 и в таблице 4.6. Согласно ним, участки высокой и очень высокой категории занимают довольно значительную долю площади тестового района – примерно по 22,5 %. Это существенно больше, чем по результатам оценки с Горно-Крымским подходом, но меньше, чем по результатам использования метода ЕРІК (рис. 4.17). В категорию очень высокой уязвимости, как и в случае с ЕРІК, попала бóльшая часть плато массива, где наблюдается хорошо выраженная закарстованность. К этой же категории оказались отнесены и участки обнажений известняков на обрывистых склонах массива и в речных каньонах, что также в основном наблюдается и на картах уязвимости согласно Горно-Крымскому подходу. Крупные воронки и котловины в пределах интенсивно закарстованной части плато получили меньшую степень уязвимости, чем окружающая территория. Участки массива со слабопроницаемым покровом практически полностью оказались в низкой и очень низкой категории уязвимости. Исключением стали водосборы активных поноров и узкие прирусловые зоны замыкающихся на них периодических водотоков, получившие категорию очень высокой уязвимости.

Результаты оценки, также как и в случае с методом ЕРІК, выявили в некоторых районах (в основном на склонах массива в его западной и северо-западной частях) связь итогового индекса уязвимости с положением в рельефе. Однако, в сравнении с результатами по ЕРІК, связь оказалась с обратным знаком. То есть, более возвышенные местоположения с маломощным почвенным покровом оказываются в более высокой категории уязвимости, чем сопряженные с ними склоны и днища балок.

Полученное площадное распределение категорий УПВ объясняется гораздо более значительным весом факторов защитного покрова, в частности, почвенного слоя, чем у того же метода ЕРІК. Участки с маломощным почвенным покровом практически всегда оказываются в категории уязвимости выше средней. Отсутствие в оценочной схеме учета защитной функции эпикарста приводит к более высокой категоризации уязвимости всех интенсивно закарстованных территорий, за исключением участков с мощным почвенным покровом. Оценка фактора русловой стока ограничивается только водосборами активных поноров, которые в пределах оцениваемой территории практически не отмечаются.

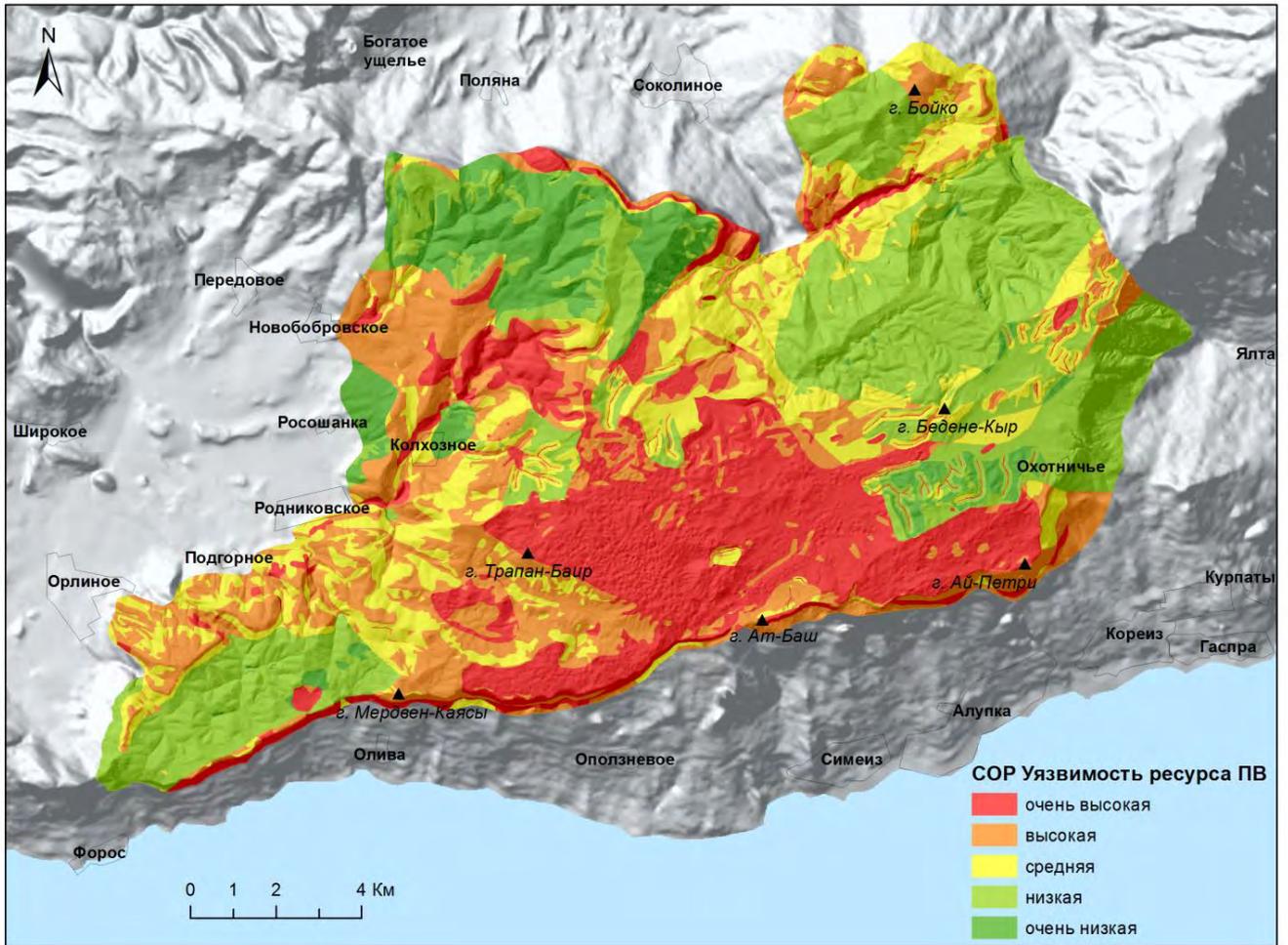


Рис. 4.16. Итоговая карта уязвимости ПВ Ай-Петринского массива, полученная на основе использования метода COP.

Таблица 4.6. Площадное распределение категорий собственной уязвимости ПВ к загрязнению в пределах Ай-Петринского массива, полученное на основе метода COP

№ п/п	Категория уязвимости	Площадь, км <sup>2</sup>	Площадь, %
1	Очень высокая	53,63	22,6
2	Высокая	53,13	22,4
3	Средняя	41,46	17,5
4	Низкая	69,43	29,2
5	Очень низкая	19,63	8,3

Подытоживая анализ результатов апробации метода COP, можно сказать, что в случае с массивом Ай-Петри в сравнении с методом ЕРІК он дает более осмысленные результаты, в некоторой части схожие с таковыми, полученными с Горно-Крымским подходом. Однако довольно большая доля площадей высокой и очень высокой категории уязвимости по итогам

оценки с методом COP представляется несколько завышенной. Отметим, что аналогичный вывод был сделан и по итогам апробации данного метода в одном из районов альпийского карста, где в категорию уязвимости выше средней было определено более 80% территории (Plan et al., 2009). В случае Горного Крыма такая проблема также просматривается, что может здесь ограничить применимость данного метода.

Как видно из вышеизложенного, результаты оценки УКПВ, проведенной на одной территории с использованием одного и того же набора данных, но разными методами, имеют довольно сильные различия. Для выяснения того, какой из методов оценки и картирования УПВ является наиболее применимым и эффективным, необходима верификация полученных результатов.

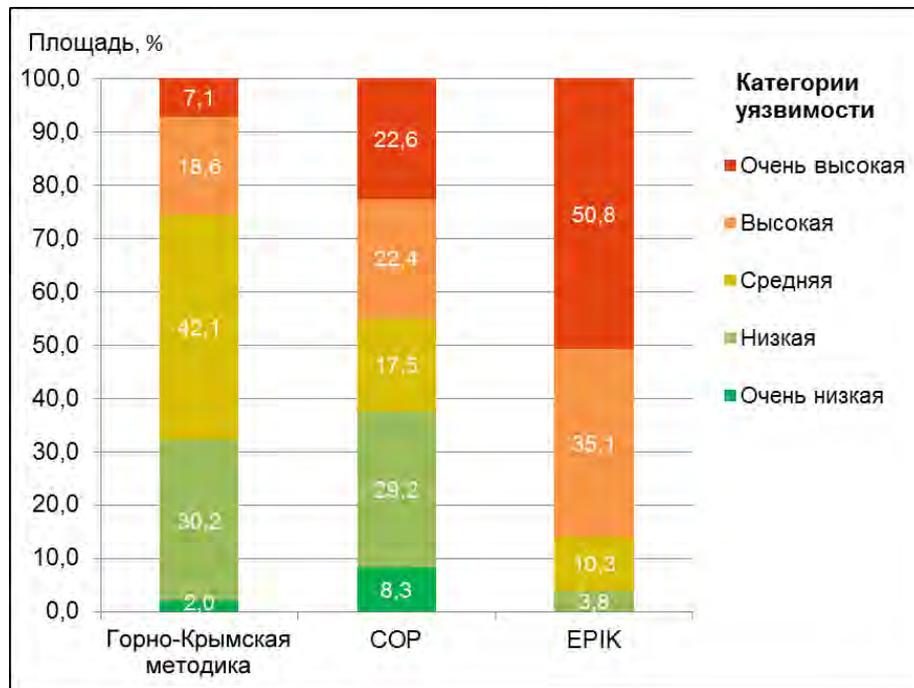


Рис. 4.17. Соотношение площадей категорий уязвимости ПВ Ай-Петринского массива, полученных с использованием различных методов.

### Выводы

Апробация Горно-Крымской методики оценки уязвимости карстовых подземных вод была произведена на территории Ай-Петринского массива площадью 237 км<sup>2</sup>, совпадающего по границам с одноименным карстовым районом. Район был выбран в связи с его репрезентативностью, сложностью геологического строения, разнообразием условий развития карста, высокой изученностью и хозяйственной освоенностью, значимостью в обеспечении региона водными ресурсами.

Подготовка к оценке включала сбор данных по отдельным факторам уязвимости, перевод

их в формат пространственных данных ГИС (геоданные), 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 Ай-Петринского массива показала, что в категорию «высокой» и «очень высокой» уязвимости попадают соответственно 18,6% и 7,1% площади оцениваемого района. К ним относятся:

- прирусловые участки крупных эрозионных и карстово-эрозионных форм рельефа, с максимальной степенью уязвимости для тех, которые развиваются на слабопроницаемом и слабокарстующемся основании;
- участки высокой поверхностной и подземной закарстованности, сосредоточенные преимущественно в центральной части плато Ай-Петри;
- линейные зоны вдоль тектонических разрывов;
- русла периодических водотоков на плато массива, замыкающихся на поноры-поглотители.

Оценка УКПВ на выходе (полная уязвимость) была произведена на примере водосборной площади источника Хаста-Баш. Согласно полученным результатам, наибольшая концентрация участков с высоким классом уязвимости находится в пределах внутренней зоны области питания оцениваемой КВС. К ним относятся участки с высокой степенью поверхностной и подземной закарстованности, приразломные зоны и участки обнажения горных пород.

Анализ чувствительности результатов оценки по Горно-Крымской методике показал, что из факторов группы «О» итоговый индекс уязвимости наиболее чувствителен к фактору «O1» (литология зоны аэрации), а из факторов группы «С» - к фактору «Crb» (русловой сток и инфлюация).

Для сравнительного анализа результатов оценки уязвимости карстовых подземных вод, полученных с использованием разных методов, дополнительно была проведена оценка по европейским методам ЕРІК и СОР. 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 в сравнении с результатами по Горно-Крымской методике, особенно в случае метода ЕРІК. Последний, очевидно, мало пригоден для региональной оценки уязвимости карстовых вод в данном масштабе.

## ГЛАВА 5

### ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОЦЕНКИ УЯЗВИМОСТИ КАРСТОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

#### 5.1. Установление зон санитарной охраны источников питьевого водоснабжения

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 систем различных типов и особенности региональных и местных гидрогеологических условий.

Согласно действующему в Российской Федерации законодательству (Водный кодекс, 2006; Федеральный закон, 1999), основной охранной мерой для источников питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения является установление зон санитарной охраны (ЗСО) с назначением для них специального режима использования. Проекты ЗСО утверждаются органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации РФ.

Проектирование ЗСО регламентируется специальным нормативным документом: СанПиН 2.1.4.1110-02 «Зоны санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов питьевого назначения» (СанПиН, 2002). Согласно нормативу, ЗСО организуется в составе трех поясов: первый пояс (строгого режима) включает территорию расположения водозаборов, площадок расположения всех водопроводных сооружений и водоподводящего канала; второй и третий пояса (пояса ограничений) включают территорию, предназначенную для охраны от загрязнения источников водоснабжения. В каждом из трех поясов, соответственно их назначению, устанавливается специальный режим и определяется комплекс мероприятий, исключающих возможность ухудшения качества воды. Определение границ ЗСО и разработка комплекса необходимых санитарных мероприятий осуществляются с учетом вида источников водоснабжения (подземных или поверхностных), степени их естественной защищенности и возможности микробного или химического загрязнения, особенностей санитарных, гидрогеологических и гидрологических условий, а также характера загрязняющих веществ. Проектирование ЗСО должно начинаться с выполнения санитарных, микробиологических, санитарно-химических, гидрогеологических и гидрологических изысканий. Концептуальная схема установления ЗСО представлена на рисунке 5.1, секция А.

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. Отметим, что условия карстовых водосборов ГК всегда соответствуют упомянутым критериям недостаточно защищенных подземных вод, однако в любом случае расширение границы первого пояса до 50 м никоим образом не может усиливать защищенность подземных вод и водозаборов в пределах остальных поясов.

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

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

Граница третьего пояса ЗСО определяется исходя из условия, что если за ее пределами в водоносный горизонт поступят химические (стабильные) загрязнения, они или не достигнут водозабора, перемещаясь с подземными водами вне области питания, или достигнут водозабора, но не ранее времени  $T_x$  (проектного срока эксплуатации водозабора – обычно не менее 25 лет).

В большинстве европейских 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 РФ (т.е., поясная организация и определение границ зон основаны на изохронах расчетного времени миграции), но отличаются номенклатура и охранные режимы зон, а также величины расчетного времени  $T$  для определения их границ. Типичным и показательным является законодательные нормы Словении, где около 95 % питьевого водоснабжения основано на подземных источниках, большая часть из которых относится к карстовым (Brenčič et al, 2009). 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 каптажа и ввода в распределительные системы, и три собственно охранных зоны – внутренняя, средняя и внешняя (рис. 5.1, секция Б). Режимы и критерии выделения зон следующие:

- Внутренняя зона - очень жесткие ограничения; целевое назначение зоны сходно с таковым для второго пояса ЗСО в РФ, но границы устанавливаются по изохроне времени миграции 50 сут (а не 400 или 200 сут, как для этого пояса в РФ).

- Средняя зона – жесткие ограничения; целевое назначение зоны сходно с таковым для третьего пояса ЗСО в РФ, но границы устанавливаются по изохроне времени миграции 400 сут (а не 25 лет, как для этого пояса в РФ).

- Внешняя зона – умеренные ограничения; зона охватывает всю область питания водоносного горизонта или комплекса.

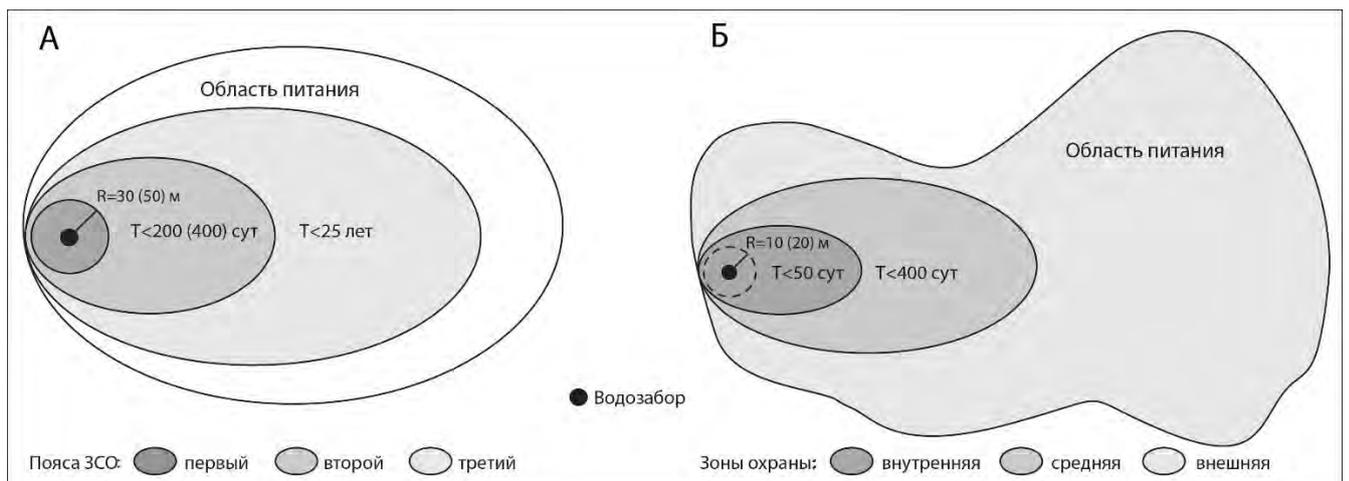


Рис. 5.1. Схема определения границ поясов ЗСО для водозаборов подземных вод согласно нормативной базе РФ (А) и Словении (Б) для поровых (гранулярных) коллекторов (Б – по Brenčič et al, 2009).

Одним из ключевых недостатков нормативных документов в РФ, определяющих

принципы установления охранных зон водозаборов, является отсутствие дифференциации систем подземных вод по типам водовмещающих сред. Подход к определению границ поясов ЗСО по изохронам времени миграции (рис. 5.3, секция А) и используемые для этого параметрические уравнения, прописанные в методических рекомендациях (Рекомендации по гидрогеологическим расчетам ..., 1983), 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 возможность поступления с ними загрязнения уменьшается) прямо пропорционально расстоянию от участков инфильтрации в области питания до водозабора. Однако этот подход является неадекватным в условиях карстовых водоносных горизонтов, в которых доминируют структуры каналовой проницаемости, наблюдаются крайне высокие концентрации 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 общей уязвимостью по условиям питания. Неприменимость традиционного (нормативного) подхода в этих условиях можно проиллюстрировать рассмотрением двух аспектов: скорости движения подземных вод и конфигурации ЗСО.

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 ( $T_m=400$  сут, для грунтовых ПВ) или 1-2 км ( $T_m=200$  сут, для межпластовых ПВ) от водозабора. При использовании предписанных норм для карстового коллектора, где типичная скорость движения карстовых вод составляет около 2000 м/сут (по данным 8000 трассерных экспериментов) (Worthington, Ford, 2009) границу второго пояса ЗСО следует устанавливать на расстояниях 800 км ( $T_m=400$  сут) или 400 км ( $T_m=200$  сут) от водозабора. При средней скорости движения карстовых вод в Горном Крыму в 3350 м/сут (Дублянский, Кикнадзе, 1984), для любого из водозаборов, использующих воды верхнеюрских отложений Главной гряды, эта граница должна быть установлена на расстояниях в 1340 км или 670 км, что выходит далеко за пределы распространения водоносного комплекса.

В традиционном подходе принята поясная конфигурация площадей различных охранных режимов относительно водозабора (источника или скважины), с установлением границ поясов по изохронам времени миграции и градацией режимов прямо пропорционально расстоянию от водозабора. Эта конфигурация исходит из допущения, что время движения потока подземных вод (и загрязнителя) возрастает прямо пропорционально расстоянию от участков инфильтрации в области питания до водозабора. Однако в условиях экспонированного карста распределение

участков инфильтрации и очаговой инфильтрации дискретно по площади области питания, а их прямая связь с каналами может обеспечивать намного более быстрое поступление загрязнителей к водозабору от удаленных участков, чем от участков рассеянной инфильтрации в ближней к водозабору зоне. Таким образом, поясная конфигурация ЗСО в таких условиях не имеет смысла.

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 карста, что обуславливает необходимость разработки и внедрения в практику специальных методологических подходов к этим вопросам.

Единственным эффективным способом научного обоснования зонирования режима охраны для подземных источников водоснабжения нами видится оценка уязвимости подземных вод в пределах области их формирования. Оценка УПВ направлена на пространственную дифференциацию области формирования вод по условиям их питания, в результате чего производится дискретное разделение территории по категориям уязвимости ПВ, т.е., таким образом, создается основа для дальнейшего зонирования охранных режимов. Как показано в Главе 3, для ПВ карстового типа необходимы специальные методы оценки уязвимости, учитывающие гидрогеологические особенности карстовых коллекторов и региональную специфику развития карста. Обоснование водоохранного зонирования для отдельных водозаборов КПВ требует проведения оценки полной уязвимости (уязвимости выхода ПВ), в том числе с учетом скоростей движения ПВ в насыщенной зоне, в пределах его водосборной площади.

Очевидно, что схема конфигурации ЗСО подземных вод в условиях карста должна иметь дискретный вид, а их границы должны устанавливаться с учетом высоких скоростей движения вод. Предлагаемые нами критерии и принципы установления зон охраны водозаборов ПВ для районов экспонированного карста представлены на рисунке 5.2. Их выработка основывается на следующих важных практических выводах, сделанных в результате исследования проблемы (Климчук, Токарев, 2014):

1) Водозаборы на карстовых источниках практически всегда прямо связаны с каналовыми системами. 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.

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 водоносного горизонта) 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.

3) При установлении методами трассирования гидравлической связи индивидуальных водозаборов с конкретными участками высокой уязвимости в области питания и времени добегания от них трассера ниже установленного порогового значения, такие участки должны определяться как зоны строгого режима, соответствующие первому поясу ЗСО по существующим нормативным документам. 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 ЗСО по существующим нормативным документам.



Рис. 5.2. Предлагаемая концептуальная схема установления границ зон санитарной охраны для водозаборов карстовых вод в Горном Крыму на основе карты полной уязвимости подземных вод

Забор карстовых вод может осуществляться как прямыми способами, с помощью традиционных сооружений забора ПВ – каптажных устройств на карстовых источниках, скважинах и колодцах, так и косвенными – заборы из поверхностных водных объектов (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 поверхностными водозаборами не предъявляется.

В карстовых регионах питание поверхностных водоемов подземными водами является обычно локализованным и часто играет основную роль в формировании стока. Поверхностные водотоки полностью или в значительной степени питаются концентрированной разгрузкой карстовых водообменных систем, в которых динамические свойства локализованных подземных потоков могут быть весьма сходными с таковыми поверхностных водотоков, области питания могут распространяться далеко за пределы поверхностных водосборов, а способность к самоочищению является крайне низкой. Кроме того, участки подземного и поверхностного течения водотоков могут перемежаться. В случаях, когда водозабор осуществляется из поверхностного водотока или водоема со значительной долей карстового питания, а питающие источники подземных вод находятся в пределах границ второго пояса (по нормам для водозаборов из поверхностных источников), то необходима организация ЗСО и для карстовых источников. По нормам определения границ ЗСО для водозаборов из поверхностных источников, граница второго пояса устанавливается вверх по течению по времени пробега по основному водотоку и его притоку не менее 5 суток.

В качестве примера приводим юго-западную часть Горного Крыма, где наблюдаются все выше перечисленные варианты забора карстовых вод: как подземные, так и поверхностные (рис. 5.3). Основой водоснабжения этого района являются КПВ, формирующиеся в карбонатных породах горного массива Ай-Петри. Подземные карстовые воды прямо (скважины и источники) или через питаемые ими водохранилища (Счастливленское, Загорское, Чернореченское) используются в водоснабжении Севастополя, Ялты и множества небольших населенных пунктов района на южном берегу, в Байдарской долине и вдоль северного склона Главной гряды.

Значительная часть подземного стока, формирующегося в пределах плато, выводится через каналовые системы в крупные источники на контурах массива, питающие реки и сооруженные на них водохранилища, - главным образом на северных и северо-западных склонах (Скельский, Пания, Суук-Су, ист. Желтой пещеры), но также и на южном склоне (Хаста-Баш, Массандровский). Основной поток подземных вод направлен к северо-западу, к Байдарской котловине, на контуре которой он частично разгружается через источники (с. Родниковское), а частично поступает в напорные водоносные горизонты котловины. Имеются

основания предполагать наличие локализованных потоков, пересекающих Байдарскую котловину и разгружающихся в русле р. Черная в Чернореченском каньоне, ниже одноименного водохранилища. Другая часть подземного стока направляется через Байдарскую котловину к очагам субмаринной разгрузки у мыса Айя. О сложной картине распределения подземного стока массива Ай-Петри дают некоторое представление стрелки на рисунке 5.5, показывающие прямые гидравлические связи по результатам трассерных экспериментов 60-х – 70-х годов. Там же указаны значения времени продвижения трассеров по этим направлениям, которые следует расценивать как завышенные в связи с недостаточно высокой дискретностью наблюдений в экспериментах. Реальная картина распределения направлений и скоростей карстовых вод намного более сложная, особенно с учетом изменчивости функционирования каналových систем в различные режимы обводненности. Для ее выявления необходимо осуществление систематических экспериментов по трассированию в современной постановке.

Наиболее крупные водозаборы показаны на рис. 5.3. Скважинные водозаборы (на самоизливе) обеспечивают водоснабжение населенных пунктов Байдарской котловины. Ключевую роль в водоснабжении Севастополя играет водозабор в устьевой части р. Черная, питаемый водой, поступающей из Чернореченского водохранилища через одноименный каньон. Само водохранилище питается главным образом из Скельского источника и других источников в долинах рек Черной и Узунжи. Главным источником водоснабжения Ялты является подаваемая по гидротоннелю вода из системы водохранилищ Загорское-Счастливое, в значительной мере питаемой карстовыми водами, а также источник Массандровский. Ряд южнобережных курортов снабжается питьевой водой водозабором на реке Хаста-Баш, питаемой одноименным источником.

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

Проведенная в Главе 4 оценка полной уязвимости для карстового источника Хаста-Баш представляет основу для дальнейшего планирования зон санитарной защиты каптажа, построенного на одноименной реке чуть ниже выхода источника. В связи с незначительным расстоянием между каптажем и выходом КПВ (около 2 км) и высокой скоростью течения этой горной реки время продвижения загрязнителя от источника к забору вод составляет всего несколько часов. Таким образом, для эффективной охраны данного каптажа от попадания в него загрязнений в состав его защитных зон нужно включить и область питания источника Хаста-Баш, при этом зонирование режимов охраны должно исходить из полученной карты уязвимости данного выхода КПВ (рис. 4.14). Зоны санитарной охраны для водозабора

предлагается устанавливать исходя из полученных границ категорий уязвимости: зоне строгого режима охраны (1-я ЗСО) соответствует категория высокой уязвимости, зоне умеренно-строгого режима (2-я ЗСО) – категория средней уязвимости, зоне общего режима (3-я ЗСО) – категория низкой уязвимости.

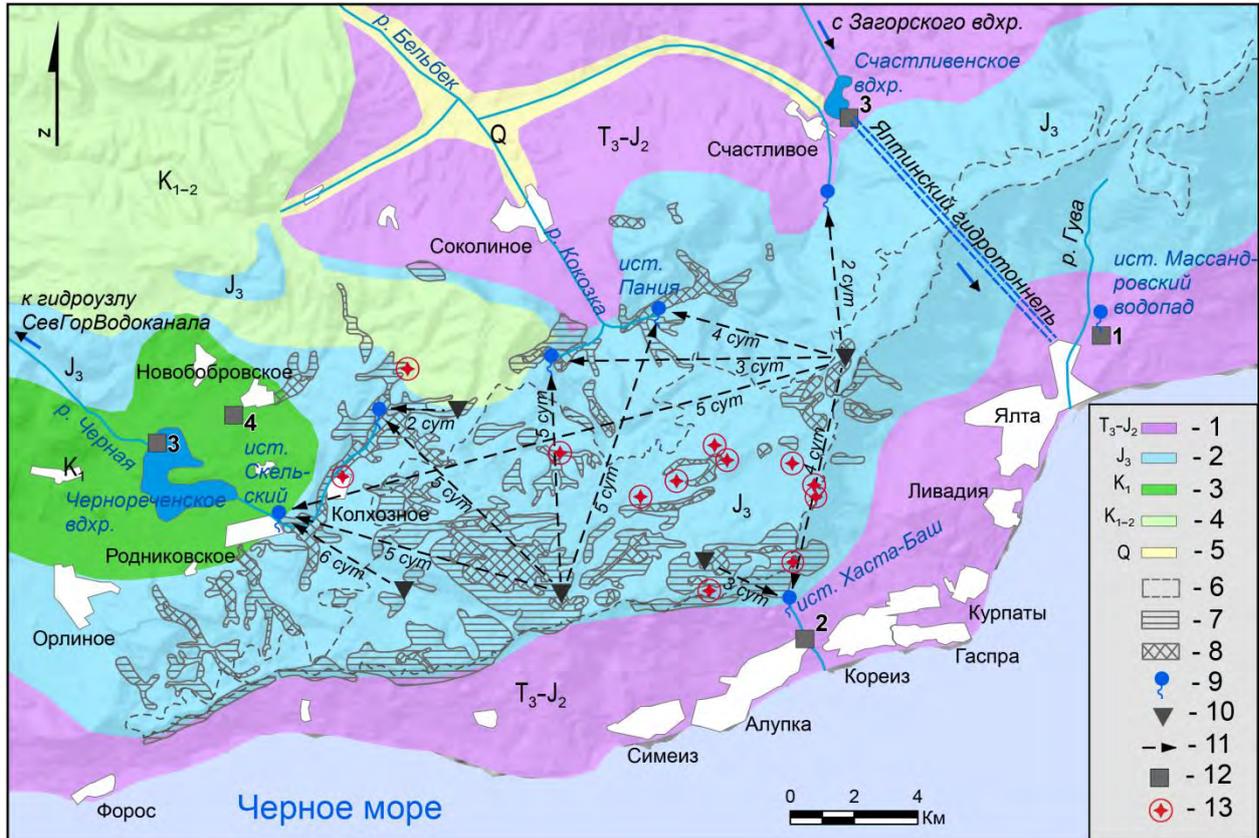


Рис. 5.3. Схема формирования и движения подземных карстовых вод и основанного на них водоснабжения юго-западной части Горного Крыма.

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

## 5.2. Оценка угроз и рисков загрязнения подземных вод

Одним из основных направлений практического использования результатов оценки и картирования УПВ является оценка рисков, связанных с загрязнением ПВ. Смысл такой оценки состоит в необходимости управления этими рисками с целью сохранения качества ресурсов ПВ.

Под угрозой в общем смысле понимается возможность наступления некоторого события, могущего повлечь неблагоприятные последствия. Под риском понимается вероятность реализации потенциальной угрозы и ожидаемые в результате этого потери (экономические, социальные, экологические).

В контексте загрязнения ПВ «угроза» определяется как фактические или потенциальные источники загрязнения, являющиеся следствием человеческой деятельности, происходящей главным образом на земной поверхности. Классификация угроз производится по видам деятельности, с учетом интенсивности, продолжительности и пространственного охвата (De Ketelaere et al, 2004). «Риск» определяется как вероятность нанесения ущерба качеству ПВ и связанных с ним экономических, социальных и экологических потерь.

По итогам работы программы Европейской комиссии COST Action 620 (Zwahlen, 2004) была предложена общая схема оценки рисков загрязнения КПВ (Европейская схема), которая основывается на оценке собственной или специфической уязвимости с одной стороны, и на оценке угроз загрязнения КПВ с другой стороны. Основываясь на модели «происхождение-путь-цель», авторами схемы был разработан подход «угроза-уязвимость-риск». В рамках оценки риска «угроза» выступает в качестве фактической или потенциальной загрязняющей деятельности (соответствует блоку модели «происхождение»), которая может нанести ущерб ресурсу подземных вод или их источникам (соответствует блоку «цель»). Риск загрязнения ПВ также зависит от индивидуальных внутренних характеристик вмещающего их водоносного горизонта, которые определяют его собственную уязвимость (соответствует блоку «путь») (De Ketelaere, Daly, 2004). Таким образом, оценка риска загрязнения ПВ достигается путем комбинации карты собственной уязвимости и карты угроз.

Важным аспектом оценки рисков загрязнения ПВ является определение важности и ценности их ресурсов и связанных с ними источников водоснабжения. Это является необходимым условием для оценки ущерба в результате ухудшения их качества. Основными факторами, принимаемыми при этом к учету, являются качественные характеристики вод (для питьевых вод, прежде всего, по санитарно-гигиеническим показателям), назначение использования вод (хозяйственно-питьевое, сельскохозяйственное, промышленное, рекреационное), степень социально-экономической зависимости от них и заменимости их ресурсов. В связи с данным аспектом предлагается различать риск загрязнения ПВ, основанный на комбинации карты собственной уязвимости и карты угроз, и риск ущерба, который может

возникнуть в результате загрязнения ПВ (далее – риск ущерба ПВ). Последний должен учитывать кроме самого риска загрязнения ПВ ценность их ресурсов.

Оценка угроз включает в себя процедуры их идентификации, инвентаризации, картографического представления, определения весовых коэффициентов, ранжирования итоговых баллов по уровням угроз с присваиванием соответствующих индексов. Кроме того необходимо учитывать пространственные (точечная, линейная или площадная локализация) и временные (круглогодичный, сезонный, периодический характер проявления) характеристики угроз.

Классификация фактических и потенциальных угроз, согласно Европейской схеме, производится на основании видов землепользования, разделенных на три группы: инфраструктурные коммуникации, промышленное производство, сельское хозяйство (De Ketelaere et al, 2004). Для каждого из видов землепользования определен весовой балл, прямо пропорциональный уровню угрозы. В рамках данной работы нами отражены лишь те виды угроз, которые представлены в районе исследования (табл. 5.1).

Таблица 5.1. Угрозы, имеющие место на Ай-Петринском массиве (весовые коэффициенты приняты согласно Европейской схеме (De Ketelaere et al, 2004))

Угроза	Весовой балл (Н)
Поселения без канализационной системы	70
Отдельные жилые строения без канализации	45
Ливнесток с асфальтных поверхностей	25
Свалки ТБО, мусорные баки	40
Складирование грунта и строительных материалов	35
Автомобильные дороги	40
Автомобильные парковки	35
Туристские поселения, палаточные лагеря	30
Лыжные трассы	25
Трансформаторные станции	30
Военные сооружения, армейские территории	35
Животноводческие фермы, загоны для скота	30
Складирование навоза	45
Площади интенсивного выпаса	25

При вычислении балла угрозы, согласно Европейской схеме, используются три коэффициента: весовой бал ( $H$  – представлен в таблице 5.1), коэффициент ранжирования ( $Q_n$ ) и понижающий коэффициент ( $R_f$ ). Посредством их перемножения вычисляется итоговый балл угрозы.

Коэффициент ранжирования ( $Q_n$ ) введен для учета вариации степени угрозы внутри одного и того же вида землепользования. Его значение зависит от степени токсичности веществ, связанных с конкретным видом землепользования, продолжительности проявления угрозы, а также ее количественных характеристик. Рекомендуемый диапазон вариации коэффициента “ $Q_n$ ” от 0,8 до 1,2. Конкретные критерии определения коэффициента для каждого из видов землепользования определяются самими пользователями методики.

Понижающий коэффициент ( $R_f$ ) устанавливается в зависимости от вероятности наступления загрязнения, т.е. реализации угрозы. При оценке вероятности во внимание принимаются такие факторы, как техническое состояние оцениваемых объектов, уровень их контроля и поддержки, окружающие условия, охранные меры. Авторами Европейской схемы рекомендуется присваивать коэффициенту “ $R_f$ ” значение 1 в случае отсутствия требуемой для его определения информации. Значения “ $R_f$ ” менее 1 подразумевает снижение вероятности загрязнения, обоснованное в достаточной мере необходимыми сведениями. Рекомендуется применение малых вариаций коэффициента, близких к 1, чтобы не допустить недооценку угроз с высоким токсическим потенциалом.

Существуют частные подходы оценки рисков загрязнения, основанные на Европейской схеме. Примером является Словенский подход, предусматривающий оценку как риска загрязнения ПВ, так и риска ущерба ПВ (Ravbar, 2007). Схема оценки представлена на рисунке 5.4. Данный подход был принят в качестве рабочего для отработки оценки рисков в пределах ключевого района исследования.

Хотя Ай-Петринский массив в целом характеризуется невысокой хозяйственной освоенностью, в сравнении с окружающими районами ЮБК и предгорий, из числа прочих карстовых массивов ГК он является наиболее освоенным. В границах характеризуемого района находятся земли лесного и лесохозяйственного хозяйства, особо охраняемых природных территорий (ООПТ), населенных пунктов, военного ведомства и транспортной инфраструктуры. Хозяйственное освоение района создает предпосылки для возникновения угроз загрязнения ПВ.



Рис. 5.4. Схема оценки риска загрязнения подземных вод и риска ущерба подземным водам согласно Словенскому подходу (Ravbar, 2007).

В границы Ай-Петринского карстового района попадают два населенных пункта: поселок Охотничье и село Колхозное. Транспортная инфраструктура наиболее развита в восточной части Ай-Петринского массива, в связи с чем она получила наибольшую хозяйственную освоенность. С севера на юг через массив, включая его плато, проходит автомобильное шоссе «Бахчисарай-Ялта» – основная транспортная магистраль в границах характеризуемого района. Не менее важную транспортную функцию выполняет канатная дорога «Мисхор – Ай-Петри» протяженностью около 3 км, соединяющая ЮБК и плато массива, работающая круглогодично.

Данная транспортная линия обеспечивает перевозку большинства посетителей плато, поскольку по автомобильному шоссе движение крупногабаритного автобусного транспорта не допускается.

До середины прошлого столетия яйлинские участки массива интенсивно использовались под выпас скота. Такой род деятельности составлял наибольшую угрозу загрязнения ПВ массива за всю историю его освоения. С начала 60-х гг. выпас скота на яйлах ГК был запрещен. В настоящее время животноводство на Ай-Петринском массиве ограничено мелкими подсобными хозяйствами, лошадиными стойлами и загонами для разведения охотничьей фауны.

Значительную часть площади Ай-Петринского массива занимают ООПТ: Ялтинский горно-лесной природный заповедник (в пределах характеризуемого района занимает площадь 45,9 км<sup>2</sup>), природные заказники «Байдарский» (площадь в пределах района 75,2 км<sup>2</sup>), «Большой каньон Крыма» (площадь 3 км<sup>2</sup>) и «Ай-Петринская яйла» (площадь около 18 км<sup>2</sup>) (Распоряжение, 2015). Их границы показаны на рисунке 5.5, кроме природного заказника «Ай-Петринская яйла», границы которого по состоянию на середину 2017 г. не утверждены. Таким образом, ООПТ занимают около 60 % площади массива. Остальная площадь массива занята в основном лесохозяйственными хозяйствами.

Массив Ай-Петри также активно используется в сфере рекреации и туризма. Наибольшую популярность имеют туристические объекты, расположенные в юго-восточной части массива, в пределах границ ЯГЛПЗ: водопад Учан-Су, смотровые площадки «Зубцы Ай-Петри», «Серебряная беседка» и «Скала Шишко», экскурсионные пещеры «Ялтинская», «Геофизическая» и «Трехглазка», пешеходные тропы «Таракташская», «Боткинская» и «Штангеевская». Также здесь развита сеть туристических маршрутов с обустроенными стоянками под палаточные лагеря.

Большая туристическая популярность плато Ай-Петри в комплексе с его транспортной доступностью повлекла стихийную самовольную застройку участка у верхней станции канатной дороги. В последние десятилетия здесь без всякого обоснования был построен целый комплекс ресторанных, торговых и гостиничных объектов, представляющих высокую угрозу загрязнения ПВ. В 2017 г. правительством Республики Крым было принято решения о ликвидации данной застройки, которое было реализовано в середине года. На ее месте обустроена зона отдыха без капитальных строений, однако остальные источники загрязнения КПВ (лошадиные загоны, выгребные ямы туалетов, предприятия общественного питания) ликвидированы не были. Таким образом, угроза загрязнения КПВ на Ай-Петринском массиве остается довольно острой и ее степень ожидаемо будет увеличиваться в связи с дальнейшим развитием туристско-рекреационной деятельности (проект создания круглогодичного

туристского комплекса на плато Ай-Петри).

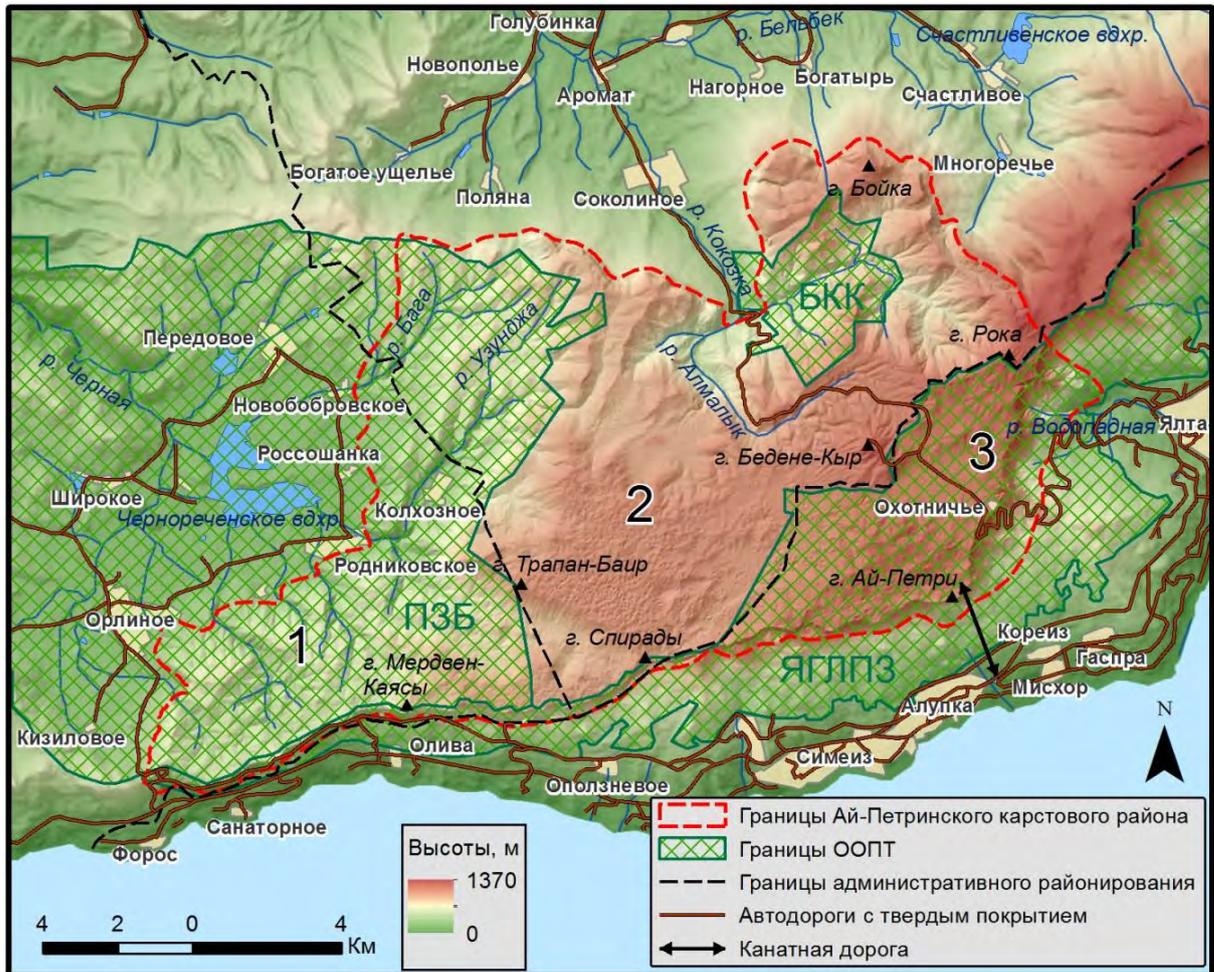


Рис. 5.5. Территориальная структура использования земель и пути транспортного сообщения района Ай-Петринского массива.

Административно-территориальные единицы: 1 – город федерального значения Севастополь, 2 – Бахчисарайский район, 3 – Ялтинский городской округ. Объекты ООПТ: ЯГЛПЗ – Ялтинский горно-лесной природный заповедник, БКК – природный заказник «Большой каньон Крыма», ПЗБ – природный заказник «Байдарский».

Объектами наибольшей угрозы загрязнения КПВ Ай-Петринского массива являются поселения, в которых отсутствует канализационная система: поселок Охотничье, село Колхозное и поселения на г. Бедене-Кыр. До недавнего времени к таковым также относился участок самовольной застройки гостиничными, ресторанными и торговыми объектами у верхней станции канатной дороги «Мисхор - Ай-Петри». На их месте организована зона отдыха без капитальных строений, с пешеходными дорожками и смотровыми площадками. Также остались работать наиболее крупные предприятия общественного питания. В летний период это место посещают несколько тысяч человек в день, поэтому данный участок при оценке угрозы

загрязнения КПВ следует рассматривать как временный (сезонный) населенный пункт.

На плато массива также имеются мелкие животноводческие фермы и загоны для скота и лошадей (рис. 5.6), автомобильные дороги, лыжные трассы, и прочие объекты, имеющие более низкую степень угрозы в сравнении с поселениями. Наибольшая концентрация и разнообразие угроз характерно для юго-восточной части массива, которая и была выбрана в качестве тестового района для отработки методики оценки рисков загрязнения и ущерба подземным водам района.

Оценка угроз загрязнения ПВ тестового района проводилась по Европейской схеме (De Ketelaere et al, 2004) с ранжированием уровней угроз согласно Словенскому подходу (Ravbar, 2007). На начальном этапе была проведена инвентаризация и площадное картирование всех объектов угроз в пределах района. Выделенным объектам в индивидуальном порядке был присвоен балл угрозы, вычисленный по предложенной в подходе формуле. Весовой балл угроз (H) определялся по разработанной авторами схеме номенклатуры (табл. 6.2). Коэффициент ранжирования ( $Q_n$ ) и понижающий коэффициент ( $R_f$ ) для всех объектов угроз, в связи с их малой значимостью и проблемами обоснования их значений, были приняты за единицу. На основе полученных баллов все объекты были ранжированы по уровням угроз. По результатам оценки все выделенные объекты оказались в рамках двух уровней угроз: низкого и среднего (рис. 5.7).



Рис. 5.6. Лошадиный загон у верхней станции канатной дороги «Мисхор - Ай-Петри» – пример объекта угрозы загрязнения ПВ Ай-Петринского массива.

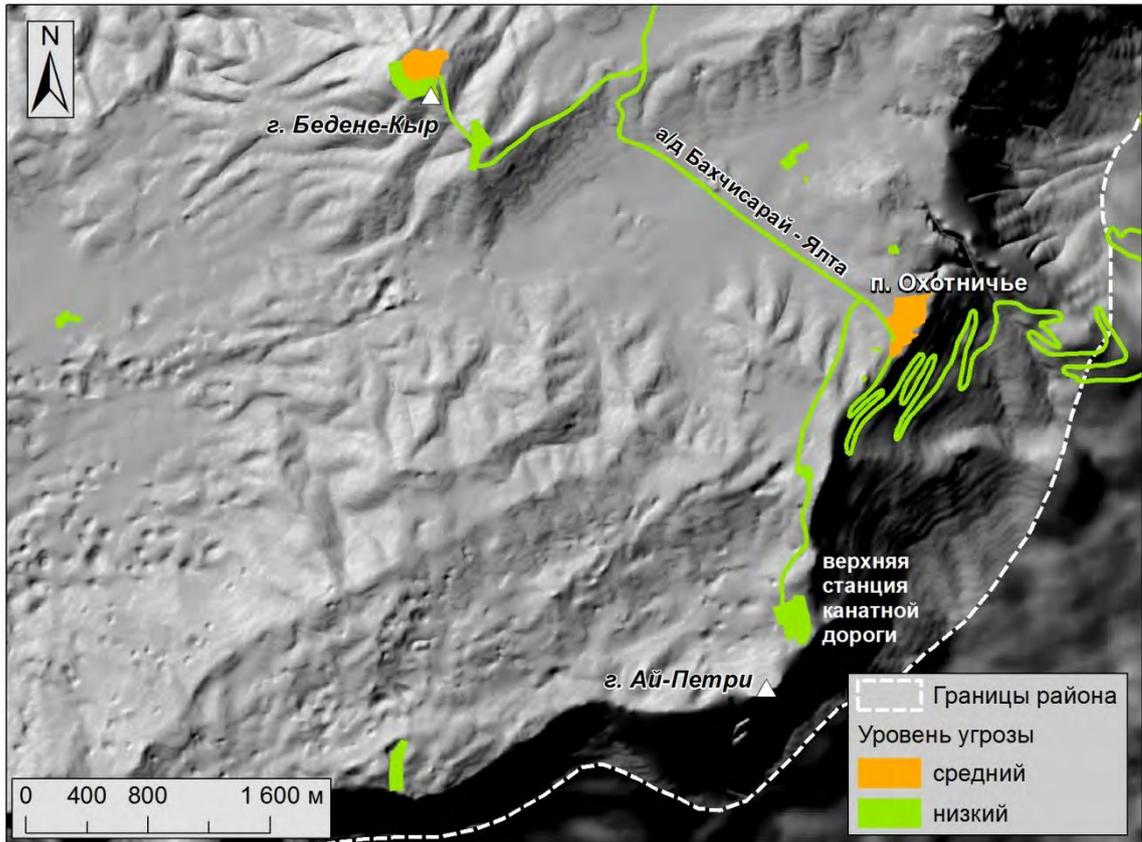


Рис. 5.7. Карта угроз загрязнения подземных вод юго-восточной части Ай-Петринского массива.

Карта риска загрязнения подземных вод была получена наложением карты угроз загрязнения на карту уязвимости ресурса ПВ в пределах тестового района. Баллы риска загрязнения ПВ получены сложением индексов угрозы и индексов уязвимости для всех объектов итоговой карты, полученных пересечением объектов исходных карт. Полученные полигональные объекты на основе рассчитанных баллов были разбиты на 3 уровня риска: «низкий», «средний», и «высокий». К высокому уровню риска загрязнения ПВ оказался отнесен лишь участок поселения на г. Бедене-Кыр, имеющий очень высокую уязвимость ресурса ПВ. Остальные объекты угроз попали в класс «среднего» и «низкого» уровней угроз (рис. 5.8, секция А). Территориям с отсутствием угроз по умолчанию был присвоен «низкий» уровень риска.

Карта риска ущерба ПВ продуцируется путем прибавления к индексу риска загрязнения индекса ценности ресурса подземных вод (или источника, в случае использования карты уязвимости выхода ПВ при оценке риска загрязнения) и последующего ранжирования полученных баллов. Исходя из высокой значимости и незаменимости рассматриваемого ресурса ПВ в водоснабжении региона, согласно схеме Словенского подхода для всей оцениваемой территории было присвоено максимальное значение индекса ценности «2».

Вследствие этого все объекты угрозы были отнесены к двум уровням риска: «среднему» и «высокому». В категории «высокого» уровня риска оказались участки всех поселений, а также участки транспортной инфраструктуры, имеющие класс уязвимости ресурса ПВ «средний» и выше (рис. 5.8, секция Б).

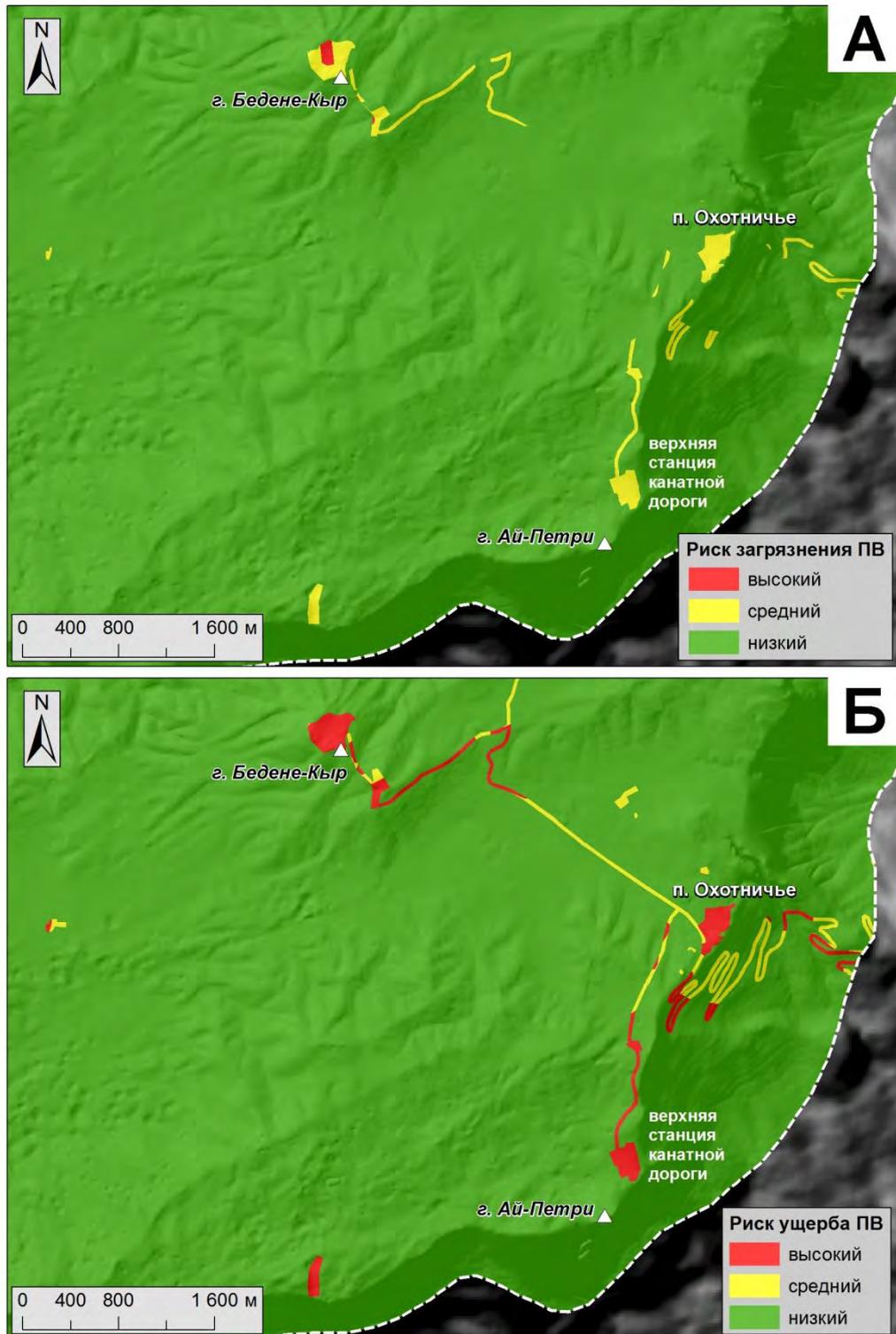


Рис. 5.8. Карты риска юго-восточной части Ай-Петринского массива: А – риска загрязнения подземных вод, Б – риска возникновения ущерба в результате загрязнения ПВ.

Результаты проведенной оценки риска необходимо использовать при стратегическом планировании территориальной структуры землепользования в данном районе, а также оперативного реагирования на последствия техногенных аварий, с целью предотвращения загрязнения подземных вод и связанного с ним ущерба.

### **Выводы**

Используемые в настоящее время принципы организации санитарной охраны источников водоснабжения, закрепленные в РФ на уровне нормативных документов, совершенно неприменимы в случае карстовых коллекторов подземных вод. Для организации эффективной 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 по всей области питания и 2) установление зон охраны водозаборов из подземных и поверхностных источников по принципу не поясной, а дискретной конфигурации, в соответствии с реальным распределением зон высокой уязвимости и распределением направлений и скоростей движения карстовых вод. 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.

Важным аспектом рационального использования карстовых вод является оценка риска потери их ресурсов в связи с ухудшением качества, т.е. загрязнением. Оценка риска загрязнения подземных вод достигается путем комбинации карты собственной уязвимости и карты угроз. Оценка угроз включает в себя процедуры их идентификации, инвентаризации, картографического представления, определения весовых коэффициентов, ранжирования итоговых баллов по уровням угроз с присваиванием соответствующих индексов.

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

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам выполнения диссертационного исследования в определенной степени решены методические и практические вопросы оценки 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: 1) преобладание безнапорных гидрогеологических условий распространения карстовых вод (в карстовых массивах), локальное проявление напорных условий (в межгорных котловинах); 2) высокая интенсивность и, в то же время, неравномерность развития карста; 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; 5) мозаичность 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) отсутствие точечной инфлюации при широком распространении линейной инфлюации; 9) широкое распространение очаговой инфильтрации в карстовых воронках; 10) 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. В качестве ее основы использовались принципы общей европейской методологии оценки уязвимости карстовых вод и частные методы: Словенский подход и метод "СОР". Усовершенствование и адаптация базовых методов заключалась во введении в оценочную схему дополнительных факторов уязвимости (фактор защитной функции эпикарстовой зоны, факторы подземной концентрации стока разрывными нарушениями и карстовыми полостями, учет питания за счет снеговых осадков), а также видоизменение оценочной схемы факторов концентрации стока, состоящее в смещении от картирования отдельных элементов (карстовых полостей, воронок, тальвегов периодических водотоков) к оценке через плотность их распределения с учетом значимых индивидуальных характеристик.

3. Апробация региональной схемы и некоторых европейских методик оценки уязвимости карстовых подземных вод произведена 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. По результатам апробации Горно-Крымской оценочной схемы на Ай-Петринском массиве в категорию «высокой» и «очень высокой» уязвимости попали соответственно 18,6% и 7,1% площади оцениваемого района. К ним относятся, прежде всего, участки с высокой концентрацией карстовых форм рельефа и тальвеги балок, замыкающиеся на поноры и разрывные нарушения, а также участки голого карста, лишенные почвенно-растительного покрова. Анализ чувствительности результатов оценки к отдельным факторам уязвимости карстовых подземных вод, полученных с использованием Горно-Крымской схемы, показал, что ведущую роль в определении индекса уязвимости в случае Ай-Петринского массива играют фактор литологии зоны аэрации, фактор эпикарста и подпочвенного слоя и фактор русловой концентрации поверхностного стока. Сравнительный анализ результатов оценки, полученных с использованием разных 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.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

ГГКГ – Главная гряда Крымских гор

ГК - Горный Крым

ЗБФМ – зоны быстрой фильтрации и миграции загрязнителей

ЗСО – зона санитарной охраны

ИМР – Институт минеральных ресурсов

КВГ – карстовый водоносный горизонт

КВС – карстовая водообменная система

КПВ – карстовые подземные воды

ПВ – подземные воды

СГУ – Симферопольский государственный университет

УКПВ – уязвимость карстовых подземных вод

УПВ – уязвимость подземных вод

ЦМР – цифровая модель рельефа

ЮБК – южный берег Крыма

ЯГГИГП – Ялтинская гидрогеологическая и инженерно-геологическая партия

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Авессаломова И.А. Экологическая оценка ландшафтов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. – 89 с.
2. Алешин А.С., Бархатов И.И., Несмеянов С.А. и др. Тектонические разрывы на участках сейсмического микрорайонирования. – М.: Наука, 1982. – 134 с.
3. Альбов С.В. Формирование подземных вод Горного Крыма / Гидрогеология СССР. Том VIII. Крым. – М.: Недра, 1970. – С. 225-232.
4. Амеличев Г.Н. Карстовые поля Крыма // Культура народов Причерноморья. – № 52, т.2. – 2004. – С.14-21.
5. Амеличев Г.Н. Скельская пещера: состояние изученности, проблемы охраны и использования // Спелеология и карстология. – 2008. – № 1. – С. 94-99.
6. Амеличев Г.Н., Тимохина Е.И., Токарев С.В. К выявлению гипогенного карста на Главной гряде Крымских гор // Теория и методы современной геоморфологии: Материалы XXXV Пленума Геоморфологической комиссии РАН, Симферополь, 3-8 октября 2016 г. / Отв. ред. Кладовщикова М.Е., Токарев С.В. – Симферополь, 2016. – Том 1. – С. 159-165.
7. Архив погоды на Ай-Петри (номер метеостанции 33998) [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://rp5.ru/Архив\\_погоды\\_на\\_Ай-Петри](https://rp5.ru/Архив_погоды_на_Ай-Петри).
8. Багрова Л.А., Лысак Н. В. К истории облесения крымских яйл // Записки Общества геоэкологов, вып. 4. – Симферополь, 2000. – С. 8-13.
9. Белоусова А.П. Качество подземных вод: современные подходы к оценке. – Москва: Наука, 2001. – 339 с.
10. Белоусова А.П., Гавич И.К., Лисенков А.Б., Попов Е.В. Экологическая гидрогеология: Учебник для вузов. – Москва: ИКЦ «Академкнига», 2006. – 397 с.
11. Боков В.А., Багрова Л.А., Тихонов А.С., Смирнов В.О. Оценка экологических опасностей и рисков. Учебное пособие. – Симферополь: издательство «Доля», 2012. – 248 с.
12. Васильев И.Н. Особенности обводнения карбонатных толщ в Крыму // Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии Украины. - Вып.3. – М.: Недра, 1971а. – С.84-92.
13. Васильев И.Н. Тектоническая трещиноватость и её гидрогеологическое значение / Комплексные изыскания при строительстве гидротоннеля в карстовой области Горного Крыма. – Симферополь, 1971б. – С. 110-123.
14. Вахрушев Б.А. Районирование карста Крымского полуострова / Б. А. Вахрушев // Спелеология и карстология. – 2009. – №3. – С. 39-46.
15. Вахрушев Б.А. Роль гидрохимических превращений в карстовом геоморфогенезе / Б. А. Вахрушев // Спелеология и карстология. – 2010. – № 4. – С. 33-43.

16. Вахрушев Б.О. Карстовий геоморфогенез Кримсько-Кавказького гірсько-карстового регіону. – Автореф. дис. ... докт.геогр.наук. – Київ, 2004. – 38 с.
17. Вахрушев Б.О. Конденсаційна складова підземного живлення річок і джерел Кримсько-Кавказького карстового регіону // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2001. – Вып. 20. – С. 283-289.
18. Ведь И.П. Особенности водно-теплового режима и микроклимата Крымских нагорий в связи с задачей их облесения: Автореф. дис. канд. геогр. наук. – М.: МГУ, 1970. – 21 с.
19. Ведь И.П. Климат и облесение крымских нагорий. – Симферополь: ТНУ, 2007. – 136 с.
20. "Водный кодекс Российской Федерации" от 03.06.2006 № 74-ФЗ (ред. от 29.07.2017)
21. Воропай Л.И., Андрейчук В.Н. Особенности карстовых ландшафтов как геосистем. Учебное пособие. – Черновцы: ЧГУ, 1985. – 82 с.
22. Всеволожский В.А. Основы гидрогеологии: Учебник. – М.: Изд-во МГУ, 2007. – 448 с.
23. Гвоздецкий Н.А. Карстовые ландшафты. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 112 с.
24. Геологическая карта Горного Крыма. Масштаб 1:200 000. Гл. ред Н.Е. Деренюк. Составил С.В. Пивоваров. – 1984.
25. Геологическая карта и разрезы Горного и Предгорного Крыма. Масштаб 1:200 000. Составил В.В. Юдин. – 2009.
26. Геология СССР. Том VIII. Крым. Часть I. Геологическое описание / Под ред. М.В. Муратова. – М.: Недра, 1969. – 576 с.
27. Гергедава Б.А. Ландшафтная характеристика карстовых пещер центральной части Северного Кавказа // Пещеры Грузии. – Вып. 8. – 1980. – С. 94-102.
28. Гидрогеология СССР. Том VIII. Крым / Ред. В.Г. Ткачук. – М.: Недра, 1970. – 364 с.
29. Глухов И.Г. Периодические колебания подземного стока и предсказания расходов источников в летнее время // Тр. Лаб. гидрогеол. проблем. – М.: Изд-во АН СССР, 1948. – Т. 3. – С. 50-56.
30. Глухов И.Г. Вопросы формирования карстовых вод Горного Крыма на примере источников Скельского, Карасу-Баши, Субаши // Вестн. МГУ. Серия 4: Геология. – Вып. 4, №1. – 1960. – С. 82-89.
31. Глухов И.Г. Гидрогеологические признаки типов карста Горного Крыма // Новости карстоведения и спелеологии, №2. – М.: 1961. – С. 17-21.
32. Головкинский Н.А. Источники Чатырдага и Бабугана / К отчету за 1892 год гидрогеолога Таврической губернии. Земской Управы. 1893. – С. 1-35.
33. Гольдберг В. М. Природные и техногенные факторы защищенности грунтовых вод // Бюлл. МОИП, 1983. – №2. – С. 103-110.

34. Гольдберг В. М. Взаимосвязь загрязнения подземных вод и природной среды. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1987. – 248 с.
35. Дидух Я.А. Растительный покров горного Крыма (структура, динамика, эволюция и охрана). Киев: Наук. думка, 1992. – 256 с.
36. Доклады о состоянии и охране окружающей среды Республики Крым за 2002-2018 гг. Министерство экологии и природных ресурсов Республики Крым [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://meco.rk.gov.ru/rus/info.php?id=604721>
37. Драган Н.А. Почвы. М. 1:1 1 200 000 // Атлас АРК. Киев – Симферополь, 2003. – С. 30.
38. Драган Н. А. Почвенные ресурсы Крыма.– Симферополь: ДОЛЯ, 2004. – 208 с.
39. Дублянский В.Н. Режим влажности почвогрунта Ай-Петринского горного массива и его гидрогеологическое значение // Почвоведение, 1967, №12. – С. 91-97.
40. Дублянский В.Н. Особенности формирования снежного покрова в западной части горного Крыма / Сб. работ Киевского ГМО. – Киев: УГМС УССР, 1968. – Вып. 4. – С. 54-64.
41. Дублянский В.Н. Методика расчета конденсации влаги в трещинно-карстовых коллекторах // Бюлл. НТИ. Сер. гидрогеол. и инж. геол. – М.: ОНТИ ВИЭМС., 1969. – №6. – С.13-17.
42. Дублянский В.Н. Карстовые пещеры и шахты Горного Крыма. – Л.: Наука, 1977. – 180 с.
43. Дублянский В.Н. Обоснование границ карстовых регионов // Картографирование и районирование карста в связи с освоением территорий. – Владивосток. 1986. – С. 35-36.
44. Дублянский В.Н. Комплексная карстовая экспедиция // Спелеология и карстология. – 2008. – №1. – С. 20-22.
45. Дублянский В.Н., Вахрушев Б.А., Амеличев Г.Н., Шутов Ю.И. Красная пещера. Опыт комплексных карстологических исследований. – М.: Изд. РУДН, 2002. – 190 с.
46. Дублянский В.Н., Вахрушев Б.А., Климчук А.Б., Киселев В.Э. Крупные карстовые полости СССР. Т.II. Крымская спелеологическая провинция. – К., 1987. – 65 с.
47. Дублянский В.Н., Вахрушев Б.А., Клюкин А.А., Душевский В.П., Амеличев Г.Н. Палеосейсмические исследования закарстованных территорий Украины. – Симферополь: СГУ, 1991. – 214 с.
48. Дублянский В.Н., Дублянская Г.Н. Картографирование, районирование и инженерно-геологическая оценка закарстованных территорий. – Новосибирск: СО РАН, 1992. – 144 с.
49. Дублянский В.Н., Дублянская Г.Н. Карстовая республика (Карст Крыма и его проблемы). – Симферополь, 1996. – 88 с.
50. Дублянский В.Н., Дублянская Г.Н. Карстование. Ч.1. Общее карстование. – Пермь: Изд-во Пермск. ун-та, 2004. – 306 с.

51. Дублянский В.Н., Кикнадзе Т.З. Гидрогеология карста альпийской складчатой области юга СССР. – М: Наука, 1984. – 128 с.
52. Дублянский В.Н., Клименко В.И., Вахрушев Б.А., Илюхин В.В. Карст и подземные воды горных массивов Западного Кавказа. – Л.: Наука, 1985. – 150 с.
53. Дублянский В.Н., Маматкулов М.М. Гидрогеология карстовых полостей // Проблемы изучения карстовых полостей гор южных областей СССР. – Ташкент, 1983. – С. 116-139.
54. Дублянский В.Н., Морозов В.И., Ерыш И.Ф., Лущик А.В., Шутов Ю.И., Климчук А.Б. Проблемы рационального использования и охраны геологической среды Крыма и прилегающих районов. – Киев, 1990. – 48 с.
55. Дублянский В.Н., Шутов Ю.И., Вознесенская И.Е. Условия формирования химического состава подземных вод в карбонатных массивах // Докл. АН СССР, № 4, 1967. – С. 911-914.
56. Дублянский Ю.В. Закономерности формирования и моделирование гидротермокарста. – Новосибирск: «Наука», 1990. – 151 с.
57. 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. – № 9. – 2012. – С. 14-21.
58. Ена А. В. Природная флора Крымского полуострова. – Симферополь: Н.Орианда, 2012. – 232 с.
59. Ена В. Г., Ена Ал. В., Ена Ан. В. Заповедные ландшафты Тавриды. – Симферополь: Бизнес-Информ, 2004. – 424 с.
60. Зекцер И.С. Подземные воды как компонент окружающей среды. – Москва: Научный мир, 2001. – 327 с.
61. Зекцер И.С., Каримова О.А., Бужуоли Ж., Буччи М. Региональная оценка уязвимости пресных подземных вод: методологические аспекты и практическое применение // Водные ресурсы. – 2004. – Т. 31, № 6. – С. 645-650.
62. Иванов Б.Н. О типологии карстового рельефа равнин, на примере Подольско-Буковинской карстовой области. // Вопросы изучения карста на юге Европейской части СССР. – 1956. – С. 131-156.
63. Иванов Б.Н. Опыт выделения естественно-исторических угодий в Горном Крыму // Научные записки Львовского государственного университета. – 1958. – Т. 4, вып. 10. – С. 131-143.
64. Иванов Б.Н., Дублянский В.Н. Морфогенетические условия формирования карста Крымских яйл. – Симферополь, 1960. – 324 с.
65. Иванов Б.Н. Карстовые районы Горного Крыма и их гидрогеологическое значение // Тр. I Укр. гидрогеол. совещ., т.1. – Киев: Изд-во АН УССР, 1961. – С. 35-47.

66. Казанцев Ю.В. Тектоника Крыма. – М.: Наука, 1982. – 112 с.
67. Каплюк Л.Ф. Некоторые водные и физические свойства мощных почв Крымских яйл / Лесоводство и агролесомелиорация. – Вып. 6. – Киев, 1965. – С. 63-72.
68. Каплюк Л.Ф. Физические и водно-физические свойства почв Крымской яйлы // Почвоведение. – 1968. - №2. – С. 72-82.
69. Каплюк Л.Ф. Динамика влажности почв крымских плато // Почвоведение. – 1973. – № 12. – С. 47-59.
70. Климат и опасные гидрометеорологические явления Крыма / Под. ред. К.Т. Логвиновой, М.Б. Барабаш. – Л.: Гидрометеоздат, 1982. – 315 с.
71. Климчук А.Б. Роль приповерхностной зоны карстовых массивов в гидрогеологии и морфогенезе карста. – Киев: ИГН, 1989. – 44 с.
72. Климчук А.Б. Основные особенности и проблемы гидрогеологии карста: спелеогенетический подход // Спелеология и карстология. – 2008. №1. – С. 23-46.
73. Климчук А.Б. Эпикарст: гидрогеология, морфогенез и эволюция. – Симферополь: Сонат, 2009. – 112 с.
74. Климчук А.Б. Эволюционная типология карста // Спелеология и карстология. – 2010. №4. – С. 23-32.
75. Климчук А.Б. Гипогенный спелеогенезис, его гидрогеологическое значение и роль в эволюции карста. – Симферополь: «ДИАЙПИ», 2013. – 180 с.
76. Климчук А.Б., Андрейчук В.Н. О сущности карста // Спелеология и карстология. – 2010. – № 5. – С. 22-47.
77. 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.
78. Климчук А.Б., Токарев С.В. Рекомендации по охране подземных источников питьевого водоснабжения в карстовых регионах // Спелеология и карстология. – 2014. – № 12. – С. 5-16.
79. Климчук А.Б., Токарев С.В., Амеличев Г.Н., Науменко В.Г., Пустовойт В.А. Изучение эпикарстовой зоны известняковых массивов горного Крыма методом георадарного профилирования // Україна: географія цілей та можливостей. Сб.наук.праць. – К.: ФОП “Лисенко М.М.”, 2012. – Т. I. – С. 139-141.
80. Комплексные изыскания при строительстве гидротоннеля в карстовой области Горного Крыма. – Симферополь, 1971. – 218 с.

81. Кондратьев С.И., Долотов В.В., Моисеев Ю.Г., Щетинин Ю.Т. Субмаринные источники пресных вод в районе м. Фиолент – м. Сарыч // Морской гидрофизический журнал. – 1998. – №3. – С.57- 69.
82. Кочкин М.А. Почвы, леса и климат Горного Крыма и пути их рационального использования. – М: Колос, 1967. – 368 с.
83. Кочуров Б.И. Экодиагностика и сбалансированное развитие: Учебное пособие. – Москва – Смоленск: Маджента, 2003. – 384 с.
84. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: Наука, 2004. – 677 с.
85. Лущик А.В., Борисенко Л.С., Тихоненков Е.П., Яковлев Е.О. Роль разломов в гидрогеологии и экологии Крыма / Вопросы развития Крыма. Научно-практический дискуссионно-аналитический сборник. – Симферополь, 1997. – Вып. 4. – С. 56-61.
86. Максимович Г.А. Основы карстоведения. – Пермь: Кн. изд-во, 1969. – Т. II. – 529 с.
87. Методология и методика оценки экологических ситуаций / Под ред. В.А. Бокова, И.Г. Черванева, Е.С. Поповчука. Симферополь: Таврия-Плюс, 2000. – 100 с.
88. Мироненко В.А, Румынин В.Г., 1990. Оценка защитных свойств зоны аэрации (применительно к загрязнению подземных вод) // Инженерная геология. – № 2. – 1990 – С. 3-18.
89. Мироненко В.А., Румынин В.Г. Проблемы гидрогеоэкологии. Монография в 3-х томах. Том 3 (книга 2). – Москва: Московский государственный горный университет, 1999. – Т. 3. – 504 с.
90. Муратов М.В. Краткий очерк геологического строения Крымского полуострова. – М.: ГНТИЛГОН, 1960. – 207 с.
91. Мухина Л.И. Принципы и методы технологической оценки природных комплексов. – М.: Наука, 1973. – 95 с.
92. Неклюдов Г.Д. О режиме подземных вод главной гряды Крымских гор // Труды совещания по вопросам комплексного изучения режима поверхностных и подземных вод в карстовых районах. – Л., 1969. – С. 43-48.
93. Олиферов А.Н. Яйла: география, лес, вода. – Симферополь: Бизнес-Информ, 2011. – 192 с.
94. Олиферов А.Н., Дублянский В.Н. Распределение снежного покрова в горном Крыму// Тр.Укр. НИГМИ. – №34. – 1962. – С.53-57
95. Орадовская А.Е., Лапшин Н.Н. Санитарная охрана водозаборов подземных вод. – М.: Недра, 1987. – 167 с.
96. Пасынков А.А. Карта дочетвертичных отложений. Масштаб 1:1 200 000 // Атлас АРК. – Кикв-Симферополь, 2003а. – С. 20.

97. Пасынков А.А. Карта тектоники. Масштаб 1:1 200 000 // Атлас АРК. – Киев-Симферополь, 2003б. – С. 19.
98. Пашковский И.С. Принципы оценки защищенности подземных вод от загрязнения / Современные проблемы гидрогеологии и гидромеханики. – СПб.: Изд. СПбГУ. – 2002. – С. 122-131.
99. Подгородецкий П.Д. Крым: Природа. Справочное издание. – Симферополь: Таврия, 1988. – 192 с.
100. Приблуда В.Д., Коджаспиров А. А., Дублянский В.Н. Баланс подземных вод юго-западной части горного Крыма // Геологический журнал. – 1979. – т.39, № 2. – С.38-46.
101. Привалова Л.А. Растительный покров восточного нагорья Крыма и его хозяйственное использование. – Труды ГНБС, 1956, Т. 26. – С. 21-34.
102. Проскурняк М.М., Андрейчук В.Н. Структура закарстованих ландшафтів. – Чернівці, 1998. – 120 с.
103. Привалова Л.А. Растительный покров нагорий Бабугана и Чатырдага. – Труды ГНБС, 1958, Т. 28. – 153 с.
104. Пчелинцев В.Ф. Образование Крымских гор. – М.-Л.: Изд-во. АН СССР. – 1962. – 87 с.
105. Распоряжение Совета министров Республики Крым от 05.02.2015 №69-р «Об утверждении Перечня особо охраняемых природных территорий регионального значения Республики Крым».
106. Рекомендации по гидрогеологическим расчетам для определения границ зон санитарной охраны подземных источников хозяйственно-питьевого водоснабжения. – М: ВНИИ ВодГео. – 1983. – 102 с.
107. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т.6. Украина и Молдавия. Вып.3. Крым. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 334 с.
108. Рогачевская Л.М. Региональная оценка уязвимости грунтовых вод восточной части Днепровского артезианского бассейна к радионуклидному загрязнению (автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук). – Москва: ИВП РАН, 2002. – 23 с.
109. Роговская Н.В. Карта естественной защищенности подземных вод от загрязнения // Природа, 1976. – №3. – С.57-76.
110. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: аналитические сети / Т. Л. Саати. – Москва: ЛИБРОКОМ, 2009. – 360 с.
111. Самохин Г.В. Спелеологические исследования Долгоруковского массива (Крым) // Свет. – № 1 (36). – 2010. – С. 32-35.

112. СанПиН 2.1.4.1110-02. Зоны санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов питьевого назначения. – Министерство здравоохранения Российской Федерации, 2002. – 43 с.
113. Соколов Д.С. Основные условия развития карста // Бюлл. МОИП, отдел геол., т. 26., вып 2. 1951. – С. 25-49.
114. Соколов Д.С. Основные условия развития карста. – М.: Госгеолтехиздат, 1962. – 321 с.
115. Справочник по климату СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 695 с.
116. Труды совещания по вопросам комплексного изучения режима поверхностных и подземных вод в карстовых районах / Под ред. Б.Н. Иванова. – Л., 1969. – 128 с.
117. Устойчивый Крым. Водные ресурсы. – Симферополь: "Таврида", 2003. – 413 с.
118. Федеральный закон "О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения" от 30.03.1999 N 52-ФЗ.
119. Филенко Р.А. Влияние метеорологических факторов и карста на сток рек Крымской области // Вестник Ленинградского университета. – Вып. 8. – С. 32-45.
120. Цыкин Р.А. Карст Сибири. – Красноярск: Красноярский ун-т, 1990. – 153 с.
121. Чернова Н.М. Растительный покров западных яйл Крыма и их хозяйственное использование. – Симферополь: Тр. Гос. Никитского Ботанического Сада им. В. М. Молотова, 1951. – Т. 25, Вып. 3. – С. 34-52.
122. Чикишев А.Г. Подземные карстовые ландшафты как особые природные комплексы // Проблемы изучения, экологии и охраны пещер. – Киев, 1987. – С. 6-7.
123. Чуринов М.В. Формирование подземных вод юго-западной части Главной гряды Крымских гор // Тр. ВСЕГИНГЕО. – 1959. – Т. 16. – С. 44-60.
124. Чуринов М.В. О карсте Горного Крыма / Региональное карстование. – М.: Изд. АН СССР, 1961. – С. 113-120.
125. Чуринов М.В. Новые данные о гидрогеологических условиях юго-западной части Главной гряды Крымских гор / Сб. статей по вопросам гидрогеологии и инженерной геологии. М., 1962. – С. 91-97.
126. Чуринов М.В. Роль карста в формировании подземных вод юго-западной части горного Крыма и направление дальнейших исследований для решения проблемы водоснабжения / Совещание по вопросам организации геофизических работ в карстовых районах Горного Крыма (Тезисы докладов). – Симферополь, 1980. – С. 15-16.
127. Шварц А.А. Экологическая гидрогеология. – Санкт-Петербург: СПбГУ, 1996. – 34 с.
128. Шестоपालов В.М., Богуславский А.С., Бублясь В.Н. Оценка защищенности и уязвимости подземных вод с учетом зон быстрой миграции. – Киев, 2007. – 120 с.

129. Шестопапов В.М., Богуславский А.С., Климчук А.Б., Фесенко А.В., Годенко Г.Е. Моделирование ресурсов подземных вод юго-западной части Горного Крыма // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2008. – Вып. 4. – С. 5-28.
130. Шестопапов В.М., Климчук А.Б., Токарев С.В., Амеличев Г.Н. Оценка уязвимости подземных вод районов открытого карста (на примере массива Ай-Петри, Крым) // Спелеология и карстология. – 2009. – № 2. – С. 11-29.
131. Шестопапов В.М., Блінов П. В., Лютий Г.Г., Саніна І.В., Руденко Ю.Ф. Сучасні принципи гідрогеологічного районування // Збірник наукових праць УкрДГРІ. – Вип. 3-4. – 2010. – С. 147-157.
132. Шутов Ю.И. Некоторые данные по гидрогеологии Горного Крыма // Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии Украины. – М.: Недра, 1971. – С. 41-50.
133. Шутов Ю.И. Воды Крыма. – Симферополь: Таврия, 1979. – 96 с.
134. Юдин В.В. Геодинамика Крыма. – Симферополь: ДИАЙПИ, 2011. – 336 с.
135. Юровский Ю.Г., Байсарович И.М., Щетинин Ю.Т., Кондратьев С.И. Мониторинг субмаринных источников в районе мыса Айя // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь, 2000. – С.46-52.
136. Albinet M., Margat J. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine // Bulletin BRGM 2nd Series. – 1970. – № 3(4). – P. 13-22.
137. Aley T. Ozark Underground Laboratory's Groundwater Tracing Handbook. Protem: Ozark Underground Laboratory, 2002. 44 pp.
138. Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H., Petty, R.J. () DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings, U.S. EPA Report 600/2-85/018. – Ada, Oklahoma. 1987. – 64 pp.
139. Al-fares W., Bakalowicz M., Guerin R., Dukhan M. Analysis of the karst aquifer structure of the Lamalou area (Herault, France) with ground penetrating radar // Journal of Applied Geophysics. – 2002. – v. 51. – P. 97-106.
140. Andreo B., Ravbar N., Vias J.M. Source vulnerability mapping in carbonate (karst) aquifers by extension of the COP method: application to pilot sites // Hydrogeol J. – 2009 – V. 17. - P. 749–758.
141. Awawdeh M., Nawafleh A. A GIS-based EPIK Model for Assessing Aquifer Vulnerability in Irbid Governorate, North Jordan // Jordan Journal of Civil Engineering. – V. 2. Iss. 3. – 2008. – P. 267-278.

142. Babiker I., Mohamed M., Hiyama T., Kato K. A GIS based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, Central Japan // *Sci. Total Environ.* – 2005. – V. 345(1-3). – P. 127-140.
143. 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.
144. Carter A.D., Palmer R.C., Monkhouse R.A. Mapping the vulnerability of groundwater to pollution from agricultural practice, particularly with respect to nitrate // *Atti Int. Conf. Vulnerab. of Soil and Groundwater to Pollutants, RIVM Proc. And Inf.*, 38. – 1987. – P. 333-342.
145. Chen Z., Auler A.S., Bakalowicz M., Drew D., Griger F., Hartmann J., Jiang G., Moosdorf N., Richts A., Stevanovic Z., Veni G., Goldscheider N. The World Karst Aquifer Mapping project: concept, mapping procedure and map of Europe // *Hydrogeol J.* – 2017. – Vol. 25. – Issue 3. – P. 771–785.
146. Civita M., De Maio M. Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: The Italian "combined" approach // *Geofisica Internacional.* – 2004. Vol. 43, No. 4. – P. 513-532.
147. Civita M., De Maio M. SINTACS: Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilita degli acqiferi all'inquanamento. Metodologia and automatizzazione. – Bologna: Pitagora Editrice, 1997. – 208 pp.
148. COST Action 65 – Hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas, Final report (COST action 65). – European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development, Report EUR 16547 EN, Brussels, 1995. – 446 pp.
149. Daly D., Dassargues A., Drew D., Dunne S., Goldscheider N., Neale S., Popescu I.C., Zwahlen F. Main concepts of the “European approach” to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. // *Hydrogeology Journal.* – 2002. – № 10. – P. 340–345.
150. De Ketelaere D., Daly D. Vulnerability in a Risk Framework. In: COST Action 620. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers // Final report COST Action 620, European Commission, Directorate, Brussels, 2004. – P. 84-85.
151. De Ketelaere D., Hötzl H., Neukum C., Civity M., Sappa G. Hazard Analysis and Mapping. In: COST Action 620. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers // Final report COST Action 620, European Commission, Directorate, Brussels, 2004. – P. 86-105.
152. Doerfliger N., Jeannin P.-Y., Zwahlehn F. 1999. Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method) // *Environmental Geology.* – 1999. – 39(2). – P. 165-176.

153. Dörfliger N., Plagnes V., Kavouri K., Balayre S., Paris C., Muet P., Subias C., Jaunat J., Huneau F., Prévost V., Marchet P., Gouin J. PaPRIKa, une méthode multicritère de cartographie de la vulnérabilité pour une gestion des ressources et des captages en milieu karstique : exemples d'application dans le Sud-Ouest de la France (PaPRIKa, a multicriteria method of mapping the vulnerability as a tool for resource and capture works management in karst: examples of application in the southwest of France) // *Géologues*. – 2009. – Vol. 163. P. 86–92.
154. Drew D., Hotzl H. (eds). Karst hydrogeology and human activities. Impacts, consequences and implications // *Int Contrib Hydrogeol*. – 1999. – V. 20. – 322 pp.
155. Droque C. Essai d'identification d'un type de structure de magasins carbonates fissures, Application a l'interpretation de certains aspects du fonctionnement hydrogeologique // *Mem.Soc.Geol.France* 1980. – № 11. – P. 101-108.
156. 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.
157. 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.
158. Ford D., Williams D.W. Karst geomorphology and hydrology. – Unwin Hyman, Boston, 1989. – 601 pp.
159. Ford D., Williams P. Karst Hydrogeology and Geomorphology. – Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2007. – 562 pp.
160. Foster S.S.D. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy // *Atti Int. Conf.Vulnerab. of Soil and Groundw. to Pollutants, RIVM Proc. and Inf.* 38, 1987. – P. 69-86.
161. Foster S., Hirata R., Andreo B. The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection? // *Hydrogeol J*. – 2013. – Vol. 21. – P. 1389–1392.
162. Gogu R.C, Dassargues A. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods // *Environ Geol*. – 2000a. – V. 39(6). – P. 549–559.
163. Gogu R.C, Dassargues A. Sensitivity analysis for the EPIK method of vulnerability assessment in a small karstic aquifer, southern Belgium // *Hydrogeology Journal*. - 2000b. – Vol. 8, Iss. 3. – P. 337-345.
164. Goldscheider N. Hydrogeology and vulnerability of karst systems – examples from the Northern Alps and the Swabian Alb. – Karlsruhe, 2002. – 259 pp.
165. Goldscheider N. Karst groundwater vulnerability mapping: application of a new method in the Swabian Alb, Germany // *Hydrogeology Journal*. – 2005. – V. 13, issue 4. – P. 555-564.

166. Goldscheider N., Klute M., Sturm S., Hötzl H. The PI method – a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers // *Z Angew Geol.* – Hannover, 2000. – № 46 (3). – P. 157–166.
167. Goldscheider N., Popescu I.C. The European Approach. In: COST Action 620. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers // Final report COST Action 620, European Commission, Directorate, Brussels, 2004. – P. 17-22.
168. Gunn J. A conceptual model for conduit flow dominated karst aquifers / *Karst Water Resources* (Proceedings of the Ankara - Antalya Symposium, July 1985). – V. 161. – 1985. – P. 587-596.
169. Hölting B., Haertle T., Hohberger K. H., Nachtigall K. H., Villinger E., Weinzierl W., Wrobel J. Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasser ueberdeckung. // *Geol Jahrb.* – 1995, C63 – P. 5-24.
170. *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems* / Andreo B., Carrasco F., Durán J.J., Jiménez P., LaMoreaux J. (Eds.). - Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. – 638 pp.
171. Ivàn V., MádI-Szönyi J. State of the art of karst vulnerability assessment: overview, evaluation and outlook // *J. Environ Earth Sci.* – 2017. – Vol. 76. – P. 112.
172. Jeannin P.Y., Cornaton F., Zwahlen F., Perrochet P. 2001. VULK: a tool for intrinsic vulnerability assessment and validation. // 7th Conf. on limestone Hydrology and Fissured Media, Besanson, France, 2001. – P. 185-190.
173. Jiménez-Madrid A., Carrasco F., Martínez C., Gogu R. C. DRISTPI, a new groundwater vulnerability mapping method for use in karstic and non-karstic aquifers // *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology.* – 2013. – Vol. 46, Part 2. – P. 245-256.
174. *Karst Aquifers - Characterization and Engineering* / Stevanovic Z. (Ed.). – Springer International Publishing, 2015. – 692 pp.
175. Kavouri K., Plagnes V., Tremoulet J., Dörfliger N., Rejiba F., Marchet P. PaPRIKa: a method for estimating karst resource and source vulnerability—application to the Ouyse karst system (southwest France) // *Hydrogeology Journal.* – 2011. – № 19. – P. 339-353.
176. Klimchouk A.B. The typology of gypsum karst according to its geological and geomorphological evolution. // Klimchouk, A., Lowe, D., Cooper, A., and Sauro, U. (Eds.), *Gypsum Karst of the World. International Journal of Speleology. Theme issue.* - 1996. - № 25 (3-4). – P. 49-60.
177. Klimchouk A.B. Towards defining, delimiting and classifying epikarst: Its origin, processes and variants of geomorphic evolution. // Jones, W.K., Culver, D.C. and Herman, J. (eds.) *Epikarst* // Proc. of the symposium, Sheperdstown, West Virginia, USA. Karst Water Institute special publication 9, 2004. – 23-35 pp.

178. Klimchouk A.B. Hypogene speleogenesis: Hydrogeological and morphogenetic perspective. - Carlsbad: National Cave and Karst Research Institute, 2007. – 106 p.
179. Klimchouk A.B., Ford D.C. Types of karst and evolution of hydrogeologic settings // A.Klimchouk, D.Ford, A.Palmer, W.Dreybrodt (eds.): Speleogenesis: Evolution of karst aquifers. – Huntsville: Natl. Speleol. Soc., 2000. – P. 45-53.
180. Margat J. Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. – BRGM Publication 68 SGL 198 HYD, Orleans. – 1968. – 123 pp.
181. Marin A.I., Dorfliger N., Andreo B. Comparative application of two methods (COP and PaPRIKa) for groundwater vulnerability mapping in Mediterranean karst aquifers (France and Spain) // Environ. Earth Science. – 2011 (Spec. Iss.). – P. 1-15.
182. Marín A.I., Ravbar N., Kovačič G., Andreo B., Petrič M. Application of Methods for Resource and Source Vulnerability Mapping in the Orehek Karst Aquifer, SW Slovenia // H2Karst Research in Limestone Hydrogeology, Environmental Earth Sciences. – 2014 (Spec. Iss.). – P. 139-150.
183. Mimi Z.A., Mahmoud N., Madi M.A. Modified DRASTIC assessment for intrinsic vulnerability mapping of karst aquifers: a case study // Environ Earth Sci. – 2011. – P. 1-10.
184. Olmer M., Rezac B., Methodical principles of maps for protection of ground water in Bohemia and Moravia scale 1:200 000 // Mem. I.A.H. – 1974. – V. 10, iss. 1. – P. 105-107.
185. Plan L., Decker K., Faber R., Wagreich M., Grasemann B. Karst morphology and groundwater vulnerability of high alpine karst plateaus // Environ Geol. – Iss. 58. – 2009. – P. 285-297.
186. Plan L., Decker K., Meissl M., Wieselthaler F., Wagreich M. Karstological research in the catchment area of the Vienna spring water main. – Vienna, 2007. – 22 p.
187. Quinlan J.F. Types of karst, with emphasis on cover beds in their classification and development // PhD Thesis, Univ. of Texas at Austin. – 1978. – 164 pp.
188. Ravbar N. The protection of karst waters. – Postojna-Ljubljana, 2007. – 254 pp.
189. Ravbar N., Goldscheider N. Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia // Acta carsologica. – 2007. – V. 36/3. – P. 397-411.
190. Ravbar N., Goldscheider N. Comparative application of four methods of groundwater vulnerability mapping in a Slovene karst catchment // Hydrogeology Journal. – 2009. – № 17, Iss. 3. – P. 725-733.
191. Robu M. Groundwater vulnerability assessment in the Motru Sec karst area, the Mehedinți mountains // Trav. Inst. Spéol. «Émile Racovitza», Bucarest, 2009. – V. XLVIII. – P. 69–81.

192. Tallini M., Gasbarri D., Ranalli D., Scozzafava M. Investigation epikarst using low-frequency GPR: example from the Gran Sasso range (Central Italy) // *Bull. Eng. Geol. Env.* – 2006. – v. 276. - № 65. – P. 435-443.
193. Van Stempvoort D., L. Ewert, and L. Wassenaar. A method for groundwater protection mapping in the Praire Province of Canada. PPWB Report No 114. National Hydrogeology Research Institute, Saskatoon, Saskatchewan, Canada. 1995. – 86 pp.
194. Vias J. M., Andreo B., Perles M. J., Carrasco F., Vadillo I., Jim'enez P. The COP method. In: COST Action 620. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers // Final report COST Action 620, European Commission, Directorate, Brussels, 2004. – P. 163-171.
195. Vias J. M., Andreo B., Perles M. J., Carrasco F., Vadillo I., Jim'enez P. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method // *Hydrogeology Journal.* – 2006. – № 14. – P. 912-925.
196. Vrana M. Ochrana prostyc podzemnich vod v Cechach a na Morava. Vysvetlivsky k tape 1:500000. - *Wat. Res. Plan Cent., Praha (in Ceco)*, 1968. – P. 254-259.
197. Vrana M. 1984. Methodology for construction of groundwater protection maps. (Lecture for UNESCO/UNEP Proj. PLCE3/29, Moscow, Sept.1981). *Hydrogeological Principles of Groundwater Protection. Vol. 1* Kazlovsky E. A. Edit, in Chief. – UNESCO/UNEP, Moscow, 1984. – P. 147-149.
198. Vrba J., Zaporozec A. (Eds.). *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability // International Contributions to Hydrogeology, International Association of Hydrogeology, Heise, Hanover, 1994. – V . 16.– 131 pp.*
199. White W.B. Conceptual models for karstic aquifers // A.Palmer, M.Palmer, I.Sasowsky (eds.) *Karst Modelling, Proceedings of the symposium held February 24-27, 1999, Charlottesville, Virginia. Karst Water Institute Special Publication 5. – Akron, 1999. – P. 11-16.*
200. Worthington S., Ford D. Self-organized permeability in carbonate aquifers // *Groundwater.* – 2009. – v. 47, № 3. – P. 326-336.
201. Worthington S., Ford D., 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.*
202. Zhang R., Hamerlinck J.D., Gloss S.P., Munn L. Determination of Nonpoint-Source Pollution Using GIS and Numerical Models // *Journal of Environmental Quality.* – 1996. – V. 25(3). – P. 411-418.

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