

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

Пермский ордена Трудового Красного Знамени государственный университет им. А. М. Горького Всесоюзный институт карстоведения и спелеологии

К. А. ГОРБУНОВА

КАРСТОВЕДЕНИЕ. ВОПРОСЫ ТИПОЛОГИИ И МОРФОЛОГИИ КАРСТА

Учебное пособие по спецкурсу

УДК 551.44

Горбунова К. А. Карстоведение. Вопросы типологии и морфологии карста: Учебное пособие по спецкурсу/Перм. ун-т. – Пермь, 1985.–88 с.

В пособии дается понятие карста как геодинамического процесса, рассматриваются геологические условия развития, классификации, морфология и практическое значение карста. Пособие рассчитано на студентов вузов, обучающихся по специальностям «Гидрогеология и инженерная геология», «Физическая география», а также инженеров-геологов, гидрогеологов и геологов, ведущих изыскания в карстовых районах.

Библиогр. 69 назв. Табл. 11. Ил. 26

Печатается по постановлению редакционно-издательского совета Пермского университета

Рецензенты: Кунгурский стационар Уральского научного центра АН СССР; старший научный сотрудник кафедры геологии Пермского политехнического института В. К. Кокаровцев

Темплан 1985, поз. 2020

Редактор Е. А. Огиенко Технический редактор Л. Г. Подорова Корректор О. В. Белодед

Сдано в набор 04.04.85. Подписано в печать 01.07.85. ЛБ06317. Формат $60\times90^1/_{16}$. Бум. тип. № 2. Гарнитура литератур. Печать высокая. Уел. печ. л. 5,5. Уч.-изд. л. 5. Тираж 1000 экз. Заказ 215. Цена 20 к.

Редакционно-издательский отдел Пермского университета. 614600. Пермь, ул. Букирева, 15

Типография Пермского университета. 614600. Пермь, ул. Букирева, 15

На обложке: Микроэлектронная фотография контакта гипса с мергелем; керн из скважины в районе г. Перми, кунгурский ярус (Н. А. Румянцева, Н. Г. Максимович)

(С) Пермский государственный университет, 1985

ВВЕДЕНИЕ

Карстующиеся породы (известняки, доломиты, мраморы, гипсы и ангидриты, писчий мел, каменная и другие соли) слагают около трети площади суши. В них широко распространен современный и древний карст. Карст оказывает влияние на многие стороны хозяйственной деятельности человека: гражданское, промышленное, дорожное, гидротехническое строительство; разработку полезных ископаемых; решение вопросов водоснабжения. Изучение геологических условий проявления карста на территории СССР приобретает большое значение в связи с возведением линейных инженерно-геологических объектов: нефте- и газопроводов, железных и шоссейных дорог (рис. 1). На карста и ликвидацию деформаций инженерных сооружений при просадках и провалах, борьбу с обводнением шахт, водоснабжение в карстовых районах затрачиваются значительные Урбанизация карстовых территорий сопровождается активизацией карстового процесса.

Карстовые области обладают водными и минеральными ресурсами. Закарстованные карбонатные толщи являются водообильными зонами, содержащими пресные подземные воды, пригодные для питьевого водоснабжения. С палеокарстовыми карбонатными коллекторами связаны месторождения нефти и газа, минеральных вод, а с древними карстовыми формами — залежи боксита, фосфорита, угля и торфа. В карстовых формах, современных и древних, могут концентрироваться россыпи алмаза, золота, платины.

Карстовые области с их своеобразными ландшафтами — живописными скалами, глубокими долинами-каньонами, мощными родниками-воклюзами, периодически исчезающими озерами, глубокими естественными шахтами и пещерами — представляют рекреационный интерес.

Пещеры карстовых областей, использовавшиеся человеком в первобытное время, имеют огромную историческую ценность. Представляя собой «естественные скважины» в земной коре, они могут быть оборудованы как подземные лаборатории для изучения растворения и подземного выветривания горных пород, трещиноватости и разрывных нарушений, подземных гравитационных процессов, формирования

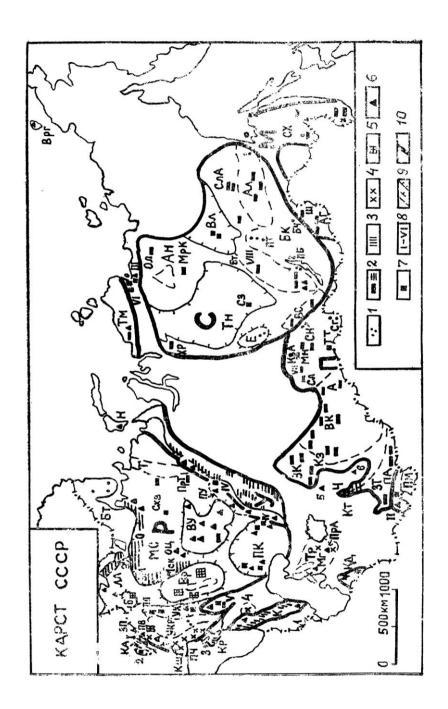


Рис. 1. Распространение карста на территории СССР (по Γ . А. Максимовичу). Карст известняков и доломитов: I — докембрийских, 2 — палеозойских, 3 — мезозойских, 4 — кайнозойских; 5 — мела, 6 — гипса и ангидрита, 7 — соли; 8 — краевые прогибы, 9 — границы структур, 10 — границы карстовых стран.

Карстовая страна и области кайнозойской складчатости:

Ka — Карпаты, Kp — Горный Крым, K — Большой Кавказ (страна), $K\mathcal{I}$ — Копет-Даг, $I\mathcal{I}$ — Памир; I — Малый Кавказ, 2 — Верхнетиссенская впадина; I — Предкарпатский прогиб, II — Предпамирский прогиб.

Карстовые области мезозойской складчатости:

CX — Сихоте-Алинь, Az — Агинско-Ононская, III — Шилкинская; III — Хатангского прогиба; Bpz — район о. Врангеля.

Карстовые страны и области палеозойской складчатости:

V — Уральская карстовая страна с карстовой провинцией Предуральского прогиба (IV) и областями: H — Новоземельской, T_M — южной зоны Таймыра, VI — Предтаймырского прогиба.

 Π — карстовая страна Сибири и Средней Азии с Казахской карстовой провинцией (K3) и областями: 3K — западной зоны Центрального Казахстана, BK — восточной зоны Центрального Казахстана, KT — Кара-Тау, 3T — Западного Тянь-Шаня, ΠA — Памиро-Алтая, A — Алтая, Cn — Салаира, K3A — Кузнецкого Алатау, Cn — Саянской, Cn — Сангиленской Mn — Минусинской впадины; VII — Кузнецкого бассейна (TT — Туз-Тагский район), U — Чуйской синеклизы (U — Район Сарысуйских куполов, U — Районы Восточной Бетпак-Далы). Карстовая провинция Туранской плиты (U с областями: U — Примангышлакской, U — Приаральской. Районы: U — Тарханкутский, U — Ставропольский. Карстовая область U — Донецкого бассейна.

Карстовые страны и области докембрийских платформ:

P — карстовая страна Русской платформы с карстовыми районами Балтийского (E_m) и Украинского $(V\kappa p)$ щитов; карстовыми областями Белорусской (Б), Воронежской (Bp) и Волго-Уральской (BV) антеклиз; с провинциями и областями Московской синеклизы (Mc): O — Онежской, 3M — Западномосковской (западное крыло), $Mc\kappa$ — Московской (южное крыло), OU — Окско-Цнинской, $C\kappa e$ — Сухонского вала, IPT — Припятского прогиба (IIII), Приуральской части Русской платформы (IV), Причерноморской впадины (IIV); 3I — Эстоно-Ленинградской, III — Латышско-Латвийской, IIB — Полесско-Волынской, III — Западно-Подольской, $K\omega$ — Кишеневской.

C — карстовая страна Сибирской платформы с провинциями и областями: $A\pi$ — Алданской, BC — Восточного Саяна, $A\mu$ — Анабарской $(O\pi$ — Оленекский, $Mp\kappa$ — Маркокский, Em — Батуобийский районы), Em — Байкальской, Em — Патомской Em — Букачачский район), Em — Енисейской, Em — Хантайско-Рыбнинской, Em — Среднеленско-Амгинской, Em — Вилюйской, Em — Ангаро-Ленского прогиба, Em — Тунгусской синеклизы Em — Сользаводский район).

5

Laborato

подземных вод. В ряде стран карстовые ландшафты объявляются государственными заповедниками. Наиболее ценные природные карстовые объекты подлежат охране.

Карст изучает карстоведение, или карстология. В нашей стране эта наука сформировалась в основном в советский период. За годы пятилеток в связи с хозяйственным освоением новых территорий, гражданским, промышленным и гидротехническим строительством в карстовых районах накопилось много данных по карсту, которые были обобщены в фундаментальных трудах Н. А. Гвоздецкого [4, 5, 6], Д. С. Соколова [36], Г. А. Максимовича [26, 27]. Важные задачи в области теории (изучение растворимости карстующихся пород в различных физико-географических и геологических обстановках, механизма провального процесса, прогноз палеокарстовых коллекторов нефти и газа и др.) и практики (оценка устойчивости закарстованных территорий, применение эффективных методов выявления карстовых полостей при инженерно-геологических исследованиях) стоят перед геологами, ведущими изыскания в карстовых районах в соответствии с «Основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1981-1985 гг. и на период до 1990 г.»

В пособии обобщаются последние достижения по ряду важнейших проблем карстоведения, по новому освещаются некоторые вопросы морфологии карста. Знание этих вопросов облегчит решение практических задач (оценка устойчивости закарстованных территорий, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых, подземных вод в карстующихся толщах и др.).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАРСТА И КАРСТОВЕДЕНИЯ

Карст как геодинамический процесс

Термин «карст» происходит от названия плато Карст или Крас в Югославии (Словении). Плато сложено мезозойскими известняками, в результате выщелачивания которых на поверхности образовались карры, поноры, воронки и другие замкнутые формы рельефа, а в толще пород — пещеры. Эти явления давно изучались европейскими географами и геологами и были названы карстовыми. Термин «карст» утвердился в научной литературе всех стран мира, в том числе отечественной.

Под карстовыми большинство исследователей понимают явления в относительно хорошо растворимых в природных

водах горных породах. Наиболее распространены из них известняки. В связи с этим французский исследователь карста Э. Мартель в 1894 г. предложил называть карстовые явления «явлениями в известняках». И. Цвийич [51] в монографии Сербский ученый известняковых земель» о карсте гипса пишет как о псевдокарсте. ангидритов, имеюший карст гипсов И распространенность по сравнению с известняковым, отличается высокой активностью. Изучение его приобретает практический интерес в связи с инженерно-геологическими исследованиями [7, 8]. Наличие соляных пород в земной коре, в первую очередь каменной соли, делает актуальным всестороннее изучение соляного карста [21].

Таким образом, к карстовым следует относить явления, развивающиеся во всех относительно хорошо растворимых природными водами горных породах: известняках, доломитах, переходных между ними разностях, мелу, мраморе, карбонатных брекчиях, гипсе и ангидрите, каменной и других солях.

Как отмечает Н. А. Гвоздецкий [5], в основе карстовых явлений лежит «химический процесс растворения горной породы и геологический процесс ее выщелачивания, т. е. растворения с удалением (выносом) растворенного вещества».

Определение понятия «карст» дано рядом исследователей. Ф. П. Саваренский под карстом разумеет «явления, связанные с деятельностью подземных вод, выражающиеся в выщелачивании растворимых горных пород (известняков, доломитов, гипса) и образовании пустот (каналов, пещер в породе), сопровождающихся часто провалами и оседаниями кровли и образованием воронок, озер и других впадин на земной поверхности». И. С. Щукин [44] понимает под карстом «как комплекс характерных форм рельефа, так и особенности поверхностной и подземной гидрографии, свойственные областям развития трещиноватых и растворимых, а потому легкопроницаемых для воды горных пород».

По мнению Д. С. Соколова [36], «карст есть процесс разрушения и уничтожения проницаемых растворимых горных пород посредством, главным образом, выщелачивания их движущимися водами; карст проявляется в образовании:

- 1) различных подземных полостей и отрицательных форм рельефа, приуроченных к самим растворимым породам, и
- 2) генетически связанных с первыми отрицательных форм рельефа и подземных полостей, наблюдаемых в нерастворимых породах, залегающих над закарстованными толщами или к ним прилегающих». В этом определении отражена одна

сторона карстового процесса – растворение, т. е. разрушение породы. К карстовым Д. С. Соколов относит и явления в некарстующихся породах, контактирующих с карстующимися. Вторая сторона (аккумулятивная) карстового процесса учтена в определении карста, принадлежащем Г. А. Максимовичу: «карст – это процесс химического и отчасти механического воздействия подземных и поверхностных внерусловых вод на растворимые проницаемые горные породы (карбонаты, гипс и ангидрит, соли, соду и др.). В результате возникают поверхностные и подземные скульптурные, а при выпадении из раствора, обрушении – и аккумулятивные формы» [26].

Таким образом, карст – это геохимический процесс взаимодействия относительно хорошо растворимых пород с природными водами, проявляющийся как и другие экзогенные процессы, в разрушении горных пород, главным образом растворении (в меньшей степени – эрозии, выветривании), миграции продуктов разрушения, т. е. переносе их преимущественно в растворенном состоянии, а также механическим путем, и отложении осадков как хемогенных (типичны), так и обломочных. Карст проявляется в зоне выветривания, где порода выщелачиванием одновременно (коррозией) подвергается химическому и биохимическому выветриванию, эрозии, в некоторых случаях – дефляции, экзарации и другим процессам, соотношение которых изменяется во времени. Интенсивность карста и других экзогенных процессов, их геоморфологическая выраженность зависят от климата, что убедительно показано Л. Якучем [45].

Карст – это сложный геодинамический процесс, оказывающий влияние на все элементы ландшафта. Мы можем рассматривать его как а) геохимический и биохимический процесс миграции химических элементов в системе порода – вода, часто при участии организмов; б) геологический процесс выщелачивания породы, изменения ее состава, структуры, текстуры и образования новых минералов, осадков, осадочных пород и полезных ископаемых; в) гидрогеологический процесс формирования коллекторов и химического состава подземных вод; г) геоморфологический процесс образования поверхностных и рельефа; д) физико-географический подземных форм формирования особого типа ландшафта; е) инженерно-геологический процесс, приводящий к изменению прочностных свойств пород и устойчивости территорий, возрастанию агрессивности степени подземных вод по отношению к основаниям сооружений.

Под термином «карст» понимают сам процесс преобразования породы и возникающие при этом формы рельефа (поверхностные

и подземные), а также отложения (сталактиты, сталагмиты и др.). Синонимом термина «карст» является термин «карстовые явления». Карстовый процесс называют также закарстовыванием, карстообразованием.

Растворимые в воде горные породы именуют карстующимися. Они занимают около трети площади суши. Широкое распространение карстующихся пород и, следовательно, карста предопределило их роль в системе природа — человек.

Явления, морфологически сходные с карстовыми

Формы, сходные с карстовыми, образуются также в некоторых рыхлых или сцементированных обломочных осадочных породах, содержащих растворимые минералы или цемент (лесс, песчаники и конгломераты с растворимым цементом). Л. И. Маруашвили в 1947 г. И Г. А. Максимович [26] предложили для обозначения явлений в таких породах термин «кластокарст». Кластокарст относится к группе суффозионных процессов. Он проявляется в растворении цемента или воднорастворимых солей в породе, нарушении ее структуры и последующем выносе частиц породы подземными водами.

Г. А. Максимович выделяет в особый тип брадикарст или силикатный карст в кварцитах, песчаниках, проявляющийся как химическое и биохимическое выветривание силикатных пород, сопровождающееся возникновением форм аналогичных карстовым.

В многолетнемерзлых породах и ледниках в результате таяния льда на поверхности появляются воронки, котловины, напоминающие карстовые формы, которые называют термокарстовыми и гляциокарстовыми [66]. Эти явления относятся к группе криогенных.

Карстоведение

Первые описания карстовых явлений на территории России относятся к началу XVIII в. (В. Н. Татищев, Ф. Страленберг, В. И. Генин). Более чем 250-летнее исследование карста подготовило почву для становления новой научной отрасли — карстоведения. В решении Пермской карстовой конференции 1947 г. указывалось на необходимость выделения этой отрасли знания.

Карстоведение или карстология изучает современный и древний карст, условия его проявления, закономерности распространения в земной коре, практическое значение. Карстоведение

включает общее, региональное карстоведение, гидрологию и гидрогеологию карста, учение о минералах и полезных ископаемых карстовых полостей и форм, инженерное карстоведение и методику изучения карста. Карстовые, а также иного генезиса пещеры являются объектом исследования спелеологии.

В нашей стране успешно развиваются два направления в карстоведении: географическое, основные достижения отражены в фундаментальных трудах таких советских географов, как Н. А. Гвоздецкий [4, М. А. Зубащенко, А. А. Крубер. 5. 6], А. В. Ступишин А. Г. Чикишев Ю. П. Пармузин. [37]. [43]. Л. И. Маруашвили, III. Я. Кипиани. 3. К. Тийтилозов Н. П. Торсуев М. М. Маматкулов [40], [28], В. А. Балков. Г. Н. Гигинейшвили и других, и геологическое – работы И. К. Зайцева [13], Д. С. Соколова [36], Г. А. Максимовича [26, 27], А. Ф. Якушовой [46], А. Г. Лыкошина [25], Н. В. Родионова, А. И. Дзенс-Литовского, Г. В. Короткевича [21], В. Н. Дублянского [10, И], Г. П. Вологодского [3], Р. А. и Ж. Л. Цыкиных [42], Т. 3. Кикнадзе [18] и других. Успешно решает практические вопросы инженерное карстоведение (И. В. Попов, И. А. Саваренский, В. И. Мартин, И. А. Печеркин, В. И. Костарев, В. С. Лукин, Ю. А. Ежов, А. Н. Ильин, В. В. Толмачев, В. Н. Кожевникова и др.). Один из разделов его посвящен карсту берегов водохранилищ (И. А. Печеркин, А. И. Печеркин). На стыке геологии и карстоведения зарождается нефтегазовое карстоведение, рассматривающее генезис карстовых коллекторов нефти и газа в карбонатных толщах (Г. А. Максимович, В. Н. Быков).

Все исследования по карсту, проводимые на территории СССР, координируют Всесоюзный институт карстоведения и спелеологии (г. Пермь) и Проблемная комиссия по карсту и спелеологии Научного совета по инженерной геологии и гидрогеологии АН СССР. Обмен опытом карстологических И спелеологических исследований осуществляется на всесоюзных конференциях И совещаниях. Международное сотрудничество в области изучения всех элементов карстового ландшафта: рельефа, поверхностных и подземных вод, пещер, карстующихся пород и пещерных отложений, полезных ископаемых карстового типа; рационального использования его богатств, охраны карстовых объектов, осуществляет Международный спелеологический союз, который созывает через каждые три-четыре года конгрессы.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВИЯ РАЗВИТИЯ КАРСТА

Карст проявляется в определенных геолого-гидрогеологических обстановках. Четыре основные условия развития карста впервые были сформулированы Ф. И. Саваренским и И. М. Кухаревым. Д. С. Соколов [36] и Г. А. Максимович [26] рассматривают каждое из них: наличие растворимых горных пород, их водопроницаемость, движение воды в массиве и растворяющая способность воды.

Карстующиеся породы

Наиболее распространенными карстующимися породами являются карбонаты, сульфаты и галоиды. Карбонатными называют породы, содержащие более 50 % карбонатных минералов. Известково-магнезиальные породы образуют одну из наиболее распространенных групп осадочных образований. Главнейшими минералами карбонатных пород являются кальцит СаСО3 и доломит $Ca,Mg(CO_3)_2$. В них присутствуют арагонит, магнезит, сидерит, анкерит. Характерной составной частью этих пород являются органические остатки или их обломки. Песчаный, алевритовый и глинистый материал незначителен в чисто карбонатных и существенен в смешанных породах.

Е. К. Фролова классифицирует карбонатные породы в зависимости от содержания кальцита, доломита и магнезита (табл. 1). В этих породах карст протекает по типу известнякового (1, 2), доломитового (5–8), магнезитового (11, 12) и смешанного (3, 4, 9, 10).

Исходя из условий накопления исходного вещества карбонаты разделяются на обломочные, биогенные, хемогенные и смешанного генезиса. Известняки образуются. преимущественно в морях и лагунах, реже - в пресных водоемах и на суше как отложения источников. Доломит в отличие от известняка содержит меньше обломочного материала, органические остатки в нем встречаются редко. Различают три генетических типа доломитов: первичные образуются в результате раствора (лагунно-морского происхождения), выпадения из сингенетические путем доломитизации известковых эпигенетические - благодаря преобразованию твердых известняков подземными или поверхностными водами.

Петрографической разновидностью известняка является мел. Это тонкозернистая порода белого, реже — желтоватого или сероватого цвета, состоящая из тончайших (0,002-0,005, редко - до 0,01 мм) частиц кальцита, кальцитовых обломков

Классификация карбонатных пород ряда известняк-доломит-магнезит (Е. К. Фролова, 1959 г.)

		-/	
Порода	Содержание, %		
Порода	доломит	кальцит	магнезит
1. Известняк	5–0	95-100	_
2. Слабодоломитовый известняк	25–5	75–95	_
3. Доломитовый известняк	50-25	50-75	_
4. Известковистый доломит	75–50	25-50	_
5. Слабоизвестковистый доломит	95–75	5-25	_
6. Доломит	100-95	0–5	
7. Очень слабомагнезиальный доломит	100-95	-	0–5
8. Слабомагнезиальный доломит	95–75		5-25
9. Магнезиальный доломит	75–50	-	25-50
10. Доломитовый магнезит	50-25	-	50–75
11. Слабодоломитовый магнезит	25–5	_	75–95
12. Магнезит	5–0	_	95-100

фораминифер, моллюсков, кокколитов, сфер, рабдолитов.

Из метаморфических пород карстуется мрамор, мелко-, средне- и крупнозернистые перекристаллизованные известняки и доломиты.

Сульфатные породы: гипс $(CaSO_4 \cdot 2H_2O)$ (CaSO₄₎ сложены одноименными минералами; среди примесей в них минералы, встречаются аутогенные глинистое вещество песчано-алевритовые обломочные зерна. Это слоистые или массивные породы от микро- до грубозернистых (обычно гипсы). Цвет гипса белый, светло-серый, желтоватый, зеленоватый, красный, черный. Ангидрит имеет светлосерую, почти белую и голубоватую окраску, реже - зеленовато-серую, темно-серую вплоть до черной или красноватую. Серые и желтоватые оттенки обусловлены наличием доломита,

глинистого и песчаного материала, розовые и красные — окислов железа, темно-серые до черных — органического вещества, зеленоватые — глинистого материала. Основная масса гипсо-ангидритовых пород лагунно-морского происхождения. Первоначальное отложение сульфата кальция в солеродных бассейнах происходило в виде гипса, который в стадию диагенеза дегидратировался до ангидрита. В зоне выветривания ангидриты в результате гидратации превращаются в гипс, образуя как бы своеобразную кору выветривания.

Из галоидов наиболее распространена каменная соль. Она является в основном мономинеральной породой, состоящей из кристаллов галита (NaCl). Соль содержит примесь глинистого материала, ангидрита, гипса, иногда магниевых, калийных и других минералов, включения газов, рассолов и т. п. Пелитовый материал имеет в основном терригенное и отчасти аутигенное происхождение. Каменная соль характеризуется кристаллически-зернистой структурой. Каменная и другие соли, гипсы и ангидриты, доломиты входят в состав галогенных формаций.

Водопроницаемость карстующихся пород

Вторым условием развития карста является водопроницаемость пород, которая может быть обусловлена 1) трещиноватостью, 2) пористостью и кавернозностью, 3) трещиноватостью в сочетании с пористостью.

Трещин новатость. Трещины — основные пути движения воды в карстующихся породах. В результате растворения стенок трещин, часто на их пересечении, образуются подземные формы карста, от мелких полостей до крупных пещер. Раскрытость трещин, их протяженность и плотность определяются генезисом трещиноватости, литологией пород и мощностью слоев. Трещины возникают на всех стадиях формирования и существования карстующейся породы — седиментогенеза, тектогенеза и гипергенеза.

Т р е щ и н ы д и а г е н е з а , или литогенетические, образуются при высыхании, утлотнении, перекристаллизации и других физико-химических превращениях породы. Они характерны для каждой литологической разновидности пород. На границе пластов возникают трещины напластования, которые проявляются при тектогенезе.

Основную роль в карстообразовании играют тектонические трещины и более крупные разрывные нарушения (сбросы, взбросы, надвиги, сдвиги), являющиеся следствием движений земной коры. Они захватывают породы

разного литологического состава на больших площадях, приобретая специфические черты в складчатых геосинклинальных областях различного возраста и осадочном чехле платформ. В дислоцированных горных породах возникают трещины растяжения, сжатия, сдвига.

Тектонические трещины определяют гидрогеологические условия. Наиболее крупные раскрытые трещины превращаются в каналы концентрированного стока карстовых вод. Роль тектонических трещин в формировании пещер отмечена многими геологами. Связь карстовых пещер с элементами разрывной тектоники прослежена В. И. Мартиным [29] на территории Башкирии для платформенной, переходной и геосинклинальной обстановок. В сульфатных породах платформенной области пещерные ходы имеют два преобладающих направления: СЗ 320–340° и СВ 20–40° (Курманаевские, Карламанская, Охлебининская и др.) и четко контролируются двумя соответствующими системами трещин. В случае горного геосинклинального карста в карбонатных породах тектонический фактор играет еще более значительную роль в формировании пещер. Наибольшая протяженность пещерных ходов наблюдается в двух направлениях: СВ 20-40° и СЗ 320-340°. По фактором В. И. Мартину, основным развития пещер платформенной, так и горноскладчатой областей служит система планетарных ортогональных и диагональных глубинных разломов кристаллического фундамента, отражающихся в осадочном чехле d виде двух систем трещин.

Наибольшая плотность пещер отмечена в узлах сопряжения структур, представляющих собой зоны интенсивных крупных разрывных нарушений и постоянной напряженности пород, а также в присводовых частях структур. В частности, на стыке трех структур – внешней зоны складчатости, Башкирского мегантиклинория и Зилаирского мегасинклинория – сосредоточено около 50 пещер общей протяженностью более 20 км, из них Сумган достигает 9,86 км, Капова - 1,9 км. В платформенной части большая часть пещер образована в положительных отличающихся сводах структур, открытой трещиноватостью и напряженным состоянием пород. Например, Усть-Атавские, Сабакаевские пещеры приурочены к Башкирскому своду, а Куэшта, Охлебининская, Карламанская, Курманаевская - к присводовой Рязано-Охлебининского части вала. Возрастание интенсивности карста в зонах современных напряжений земной коры В. С. Штенгеловым М. В. Комаровым И примере Закарпатья, Крыма и Западного Причерноморья.

Тесная связь пещер с тектонической трещиноватостью

наблюдается в Приднестровской гипсовой полосе Западной Подолии. По данным И. Д. Гофштейна, В. Н. Дублянского, В. Н. Андрейчука и др., здесь выделяется две взаимно перпендикулярные системы трещин, одна из них имеет карпатское (северо-западное) направление, другая – перпендикулярное ему. Обе системы рассекают породы от кембрия до сармата. Мощность гипсов верхнего тортона, в которых образовались длиннейшие пещеры (Оптимистическая 151 км), не превышает 40 м. В пещерах трещины и ходы северо-восточного направления преобладают над северо-западными. Трещинообразование в Приднестровье связано с региональными прерывистыми поднятиями, подвижками тектонических разрывов древних карпатского направления блоковыми движениями. Суммарные поднятия юго-восточной части Подольской плиты с конца плиоцена до настоящего времени составили 250-300 м.

Определяющее воздействие на гидрогеологию карстовых массивов горных стран и формирование карстовых форм оказывают крупные разрывные нарушения и сопровождающие их приразломные трещины.

Экзогенные трещины возникают в зоне выветривания как результат выветривания, гравитационных процессов, снятия геостатического давления на участках, подвергающихся эрозии, гидратации, карстообразованию.

Выветривание сильно изменяет решетку трещин в горной породе [33]. Оно способствует раскрытию трещин иного генезиса. Основными чертами трещин выветривания являются 1) затухание с глубиной, нахождение вблизи земной поверхности; 2) выветривание заполнителя и стенок; 3) небольшая протяженность; 4) разнообразие ориентировки. широкое распространение трещин отмечает 3. К. Тинтилозов Западной Грузии. данным выветривания известняках А. Б. Климчука и др. [19], в палеозойских известняках массива Кырктау трещиноватость выветривания развита повсеместно, причем даже под Приповерхностная суглинков. покровом лёссовидных интенсивного выветривания мощностью от нескольких метров до первых десятков метров характеризуется густой сетью трещин, затухающих с глубиной. Ниже располагается монолитная зона, водопроницаемость которой обусловлена главным образом секущей тектонической трещиноватостью.

В зоне выветривания в гипсовых кепроках соляных куполов возникают трещины и нарушения сбросового типа в результате различия скорости накопления и мощности элювиального гипса над литологически разными горизонтами, слагающими свод соляного массива. По данным С. С. Коробова

и И. К. Поленова, на одном из солянокупольных поднятий Прикаспийской впадины при бурении, проходке шахт и карьеров фиксировались многочисленные трещины по всему разрезу гипсового кепрока (мощностью 50–60 м).

С гидратацией ангидрита связано возникновение куполовидных складок в вышележащих породах, сопровождающееся растяжением и образованием трещин. Гидратация ангидрита обычно предшествует карстообразованию или протекает одновременно с ним.

На склонах речных долин и придолинных участках водоразделов на развитие карста оказывают влияние трещины бортового отпора По А. Г. Лыкошину, они (отседания, откоса). обычно бывают открытыми, верхней часто имишони В части. книзу выклинивающимися. В вертикальном разрезе они криволинейны с падением в сторону речной долины, в плане – простираются вдоль склона. Образование трещин бортового отпора связано с разгрузкой внутреннего напряжения массива в сторону речной долины. Вдоль этих трещин возникают небольшие пещеры, а на поверхности – цепи воронок, карстовые рвы, происходит отседание блоков пород.

Карстовые трещины возникают в породах в результате их просадки или обрушения в карстовую полость. Карстовый процесс, связанный с трещинами, на определенной стадии приводит к образованию трещин в стенках полостей и провалов. Наблюдения И. М. Переслегина в Кунгурском районе показали, что провалу в гипсах на поверхности предшествует появление системы трещин, образующих замкнутый полигон, число сторон которого не менее шести. Длина сторон полигонов обычно не более 1–1,5 м, ширина трещин до 5 см. Трещины возникают и в рыхлых отложениях, покрывающих закарстованные породы. Например, провалу в с. Усть-Кишерть 28 августа 1949 г. предшествовало проседание поверхности в виде блюдцеобразного понижения с дугообразной трещиной в северо-западной стенке.

Трещины могут появляться и в древних провалах в результате суффозии и последующего оседания грунта. В этом же районе на северном склоне древней котловины возникла в 1977 г. трещина длиной 15,3 м, раскрытостью 97 см, глубиной до 1,4 м. От нее отходили две трещины длиной 1,7 м и 2,4 м. Параллельно главной образовалась еще одна трещина длиной 6 м и шириной 53 см. В последующие годы трещины заполнились продуктами обрушения стенок.

Как отмечают Г. Н. Авдеев и С. Н. Чернышев, в каждом массиве пород имеются трещины разных этапов его эволюции: 1) законсервированные, возникающие на предыдущих

этапах; 2) унаследованные, развивающиеся на новом этапе; 3) новообразованные. В карстовых массивах все виды трещин преобразуются карстом. Параметры тектонических и литогенетических трещин определяются литологией пород и мощностью слоев.

В. Г. Попов и Р. Ф. Абдрахманов систематизировали материалы многолетних исследований трещиноватости карстующихся пермских Предуралья. массивных среднепород Башкирского В толстослоистых известняках трещины расположены в 0,5-2,5 м друг от друга и имеют ширину 1–20 см, а в тонкослоистых – соответственно в 0,1-0,4 м и имеют ширину 0,5-3 см. В гипсах ширина внутрислойных 1-1,5 см. напластования трещин менее Трещины наибольшей густотой (0,03-0,1 м) и наименьшей раскрытостью (0,1-0,3 см) в тонкослоистых глинистых известняках. В средне- и толстослоистых известняках густота их составляет 0,5-0,8 м, а ширина -0,1-3 см. Трещины выветривания имеют небольшую протяженность и сложный рисунок. Открытые в приповерхностной зоне, на глубине 20-40 м они переходят в скрытые. В долинах рек развиты трещины разгрузки.

В гипсо-ангидритовых толщах на сравнительно небольшой глубине в зоне сульфатно-кальциевых вод с минерализацией более 2 г/л наблюдается залечивание трещин вторичным гипсом. Например, в скважине на территории с. Усть-Кишерть (Пермская область) в ангидритах ниже гипсо-ангидритового раздела на глубине 50 м вертикальные трещины шириной до 3 см заполнены опаловидным гипсом.

Трещины разного генезиса образуют в породе сложную сеть, которая определяет циркуляцию воды в массиве. Фильтрация воды в породе может происходить и по микротрещинам. Согласно М. Х. Булачу и Е. М. Смехову, связь ориентировки карстовых форм с геометрией основных систем тектонических трещин можно использовать для прогноза вероятных направлений развития карстовых полостей на глубине. А. И. Печеркин и Г. Б. Болотов учитывают данные о трещиноватости пород при реставрации погребенного карстового рельефа.

Изучение трещиноватости является одной из основных задач карстологических и спелеологических исследований. Наблюдения над трещиноватостью можно производить в обнажениях, керне буровых скважин, стенках пещер, колодцев и шахт. В последних прослеживается изменение с глубиной плотности трещин, степени их раскрытости, состава заполнителя, обводненности, связи с натечными образованиями.

И. Н. Васильев и Л. П. Задорожная [2] намечают три этапа в исследовании трещиноватости горных пород. На первом этапе собирают фактический материал – определяют элементы ориентировки, характер стенок, размеры элементов трещин (зияние, протяженность), состав заполнителя, водопроявление, фиксируют приуроченность трещин к элементам тектонической структуры и литологическим комплексам пород. При изучении трещиноватости используются фотометоды, а также методы морфоструктурного анализа.

Второй этап включает статистическую обработку первичного материала, которая позволяет сгруппировать его в соответствии с геологической задачей, получить характеристики трещиноватости, выполнить графические построения, выявить основные системы трещин, вычислить значения густоты трещин, оценить обусловленную трещиноватостью анизотропию свойств разреза. На третьем этапе трещиноватость анализируется фоне тектонических. на литологических, инженерно-геологических либо гидрогеологических характеристик. Составляется математическая модель и прогноз явления. Методика изучения тектонической трещиноватостиплатформенных структур для карстологических целей разработана А. И. Печеркиным, Г. Б. Болотовым, В. Н. Катаевым [31].

Пористость и кавернозность. Поры — это промежутки между зернами и полости в твердых породах диаметром до 1 мм. Каверны — полости округлой формы диаметром более 1 мм. Объем всех сингенетических (первичных) и эпигенетических (вторичных) пор, каверн, микротрещин в горных породах составляет пористость. Она характеризуется коэффициентом, равным отношению объема пор ко всему объему породы (в %).

Различают пористость 1) общую, т. е. суммарный объем всех полостей; 2) закрытую – совокупность замкнутых, не имеющих между собой сообщения, пор; 3) открытую (эффективную) – совокупность сообщающихся между собой пор и пустот, по которым возможно движение жидкости и газов. Последний вид пористости может играть важную роль в процессах закарстовывания. Экспериментальные исследования Н. В. Родионова в фильтрационном приборе показали, что доломиты с пористостью 7,12 и 29,58 % разрушаются до доломитовой муки. Подобный процесс происходит и в природе.

Трещиноватость и пористость. Трещины и поры образуют единую гидравлическую систему. Некоторые породы, например мел, обладающие значительной пористостью, карстуются только при наличии трещин.

Движение воды в карстующихся породах

Карстующийся массив разделяется на область питания, т. е. инфильтрации и инфлюации атмосферных осадков и поверхностных вод, область подземного стока и область разгрузки или выхода карстовых вод за пределы карстующихся пород. Условия движения карстовых вод определяются литологической неоднородностью массива, его дислоцированностью, глубиной эрозионного расчленения и степенью закарстованности. В карстующемся массиве, вскрытом речной долиной, наблюдается вертикальная зональность интенсивности водообмена, рассмотренная И. К. Зайцевым [13], Д. С. Соколовым [36], Г. А. Максимовичем [26].

Г. А. Максимович характеризует следующие гидродинамические зоны (рис. 2).

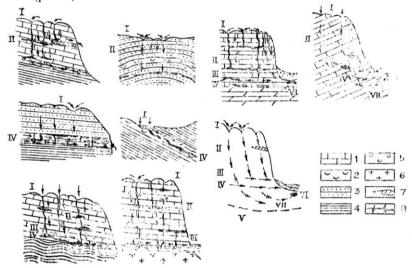


Рис. 2. Зоны циркуляции карстовых вод (по Γ . А. Максимовичу): I – известняк, 2 – гипс, ангидрит, 3 – песчаник, 4 – глинистая порода, 5 – конгломерат, 6 – магматическая порода, 7 – водоупор, 8 – пещера

I. Зона поверхностной циркуляции. Атмосферные осадки или талая снеговая вода стекают по поверхности пород и в условиях голого, задернованного карста поглощаются путем инфлюации и инфильтрации трещинами, каррами, понорами. В условиях покрытого и закрытого карста вода стекает в сторону воронок, котловин, карстовых рвов и других

отрицательных форм, где поглощается трещинами и понорами. Путь движения воды по поверхности породы тем короче, чем более она трещиновата или закарстована.

II. Зона вертикальной нисходящей циркуляции (периодической циркуляции по И. К. Зайцеву или аэрации по Д. С. Соколову). В периоды выпадения осадков или таяния снега вода движется вниз по вертикальным трещинам. В горных районах эта зона обладает значительной фильтрационной неоднородностью. Верхняя подзона трещиноватости выветривания интенсивной обладает водопроницаемостью. В нижней подзоне водопроницаемость обусловлена в основном тектонической трещиноватостью. На границе подзон формируется горизонт висячих карстовых вод, который срабатывается крупными трещинами нижней подзоны. Горизонт висячих вод может образоваться также на прослоях менее проницаемых пород в карстовом массиве.

Условия движения, конденсации воды в этой зоне, виды водопроявлений могут быть изучены в колодцах и шахтах. По наблюдениям (июль—август) А. Б. Климчука, В. Я. Рогожникова и А. А. Ломаева [19], в палеозойских известняках массива Кырктау в колодцах и шахтах глубиной до 30 м водопроявления не отмечены. В более глубоких полостях наблюдается капеж, а на глубине 50–60 м зафиксированы повсеместное увлажнение стен, пленочные потоки, небольшие озера. В шахтах КТ-16, Киевская (КТ-28) и других с глубины 90–100 м появляются постоянные водотоки с расходом 2–3 л/с; в Киевской на глубине свыше 900 м расход составляет до 20 л/с.

III. Зона сезонных колебаний уровня карстовых вод (переходная) имеет различную мощность в зависимости от климатических условий (количества атмосферных осадков, распределения их по сезонам года), расчленения глубины массива, степени его тектонической нарушенности и закарстованности. По В. Н. Дублянскому [10], мощность зоны в пещерах и шахтах: Горного Крыма до 13 м, в пещерах-источниках 8,5-10,0 м. Наибольший подъем воды отмечен в Скельской пещере-источнике – 45 м. На плато Карст в Шкоцианской пещере наивысший уровень реки (114 м) зафиксирован в январе 1826 г. В ордовикских известняках Силурийского плато мощность зоны сезонных колебаний карстовых вод достигает 15 м.

IV. Зона горизонтальной (субгоризонтальной) циркуляции карстовых вод представляет собой горизонт карстовых вод в карстовых бассейнах или часть водоносной системы с концентрированным стоком в сторону областей разгрузки. Карстовые воды разгружаются в другие водоносные горизонты,

в русла рек и подрусловые полости, моря, озера, в виде родников на поверхности. Д. С. Соколов рассматривает случай, когда эта зона находится в сфере дренирующего влияния местной гидрографической сети. В мощных толщах карстующихся пород нижняя граница зоны обычно опускается ниже русел рек или контролируется положением водоупора.

V. Зона глубинной циркуляции представляет собой горизонт напорных трещинно-карстовых вод, залегающих ниже эрозионных врезов, с замедленным движением в сторону региональных областей разгрузки. Воды этой зоны более минерализованы и менее агрессивны по сравнению с верхними зонами.

В магистральных речных долинах под руслами рек формируется зона поддолинного движения карстовых вод (VI) по каналам и полостям с продольным стоком по отношению к долине. Эта зона вскрыта в пермских гипсах при бурении в долинах рек Чусовой и Сылвы.

Произвольное толкование имеет термин «зона сифонной циркуляции» (VII). Видимо, ее надо понимать как зону восходящего движения напорных карстовых вод по тектоническим нарушениям или вдоль литологических контактов к местам разгрузки.

Развитие карста может быть связано с разгрузкой глубинных напорных минеральных или термальных вод по зонам тектонических нарушений. В зависимости от геолого-геоморфологических

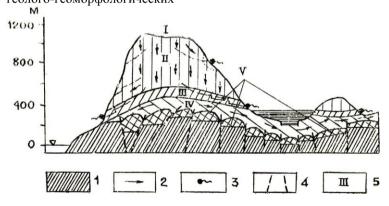


Рис. 3. Схема вертикальной гидродинамической зональности карстовых вод Горного Крыма (по В. Н. Дублянскому): 1 – водоупор, 2 – направление подземного стока, 3 – родник, 4 – тектонические нарушения, 5 – гидродинамические зоны

условий наблюдаются различные гидродинамические профили с определенным сочетанием гидродинамических зон. Рассмотрим гидродинамические условия карстующихся массивов, расположенных в горноскладчатых и платформенных областях.

Горный Крым. Гидродинамическую зональность изучали В. Н. Дублянский, Ю. И. Шутов, В. С. Штенгелов и др. Опыты с окрашиванием поверхностных и подземных потоков флюоресцеином позволили определить пути подземного стока карстовых вод, перекрещивание их на разной глубине от поверхности, установить главную роль в переориентировании подземного стока субширотных нарушений. В отдельных бассейнах карстовых вод выражены зоны поверхностной (I), вертикальной нисходящей (II), переходной (III), горизонтальной или субгоризонтальной (IV) циркуляции и глубинная (V) с замедленной циркуляцией (рис. 3). Разгрузка карстовых вод родниковая наземная, подземная, местами субмаринная.

Динариды (Югославия). Массивы мезозойских из вестняков

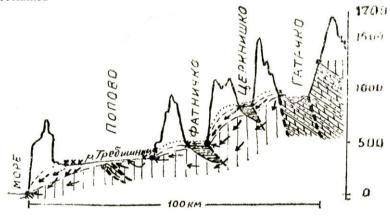


Рис. 4. Гидрогеологические условия польев Гатачко-Попово в Югославии (по П. Т. Милановичу): I — некарстующиеся от ложения неогена, флиш эоцена и мела; 2 — доломит; 3 — известняки необводненные и водоносные; 4 — разрывные нарушения; 5 — уровень карстовых вод: экстремальный, максимальный во влажный период, минимальный в сухой период; 6 — направление стока карстовых вод при максимальном и минимальном уровнях; 7 — родник; 8 — понор

разделяются польями, приуроченными к участкам, сложенным флишем или доломитами. Несмотря на кажущуюся изолированность карбонатных массивов карстовые воды их связаны в единую водоносную систему. В отдельных массивах четко выделяются основные гидродинамические зоны. Как и в Крыму, здесь обнаружены концентрированные подземные потоки, пересекающиеся на разных уровнях (рис. 4).

С и л у р и й с к о е п л а т о (Р у с с к а я п л а т ф о р м а). Оно сложено трещиноватыми известняками и доломитами ордовика мощностью до 140 м, залегающими почти горизонтально. Интенсивная трещиноватость известняков способствовала их закарстовыванию. Зеркало трещинно-карстовых вод имеет куполовидное залегание. В верхней части закарстованного массива до глубины вреза речной сети карстовые воды движутся от центральной к краевым частям массива. Они разгружаются в виде многочисленных источников по периферии плато, а также в долинах рек. Ниже уровня речных долин карстовые воды вовлекаются в общий региональный сток, ориентированный на юг, в направлении пологого

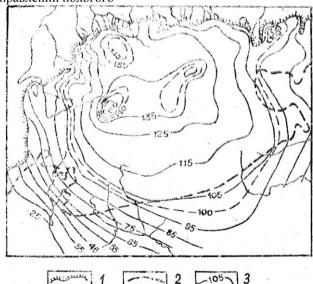


Рис. 5. Гидроизогипсы Силурийского плато (по Ю. М. Гуревичу): *1* – глинт, *2* – северная граница распространения девонских отложений, *3* – гидроизогипсы

погружения известняково-доломитовой толщи (рис. 5). Ю. М. Гуревич выделяет поверхностную, вертикальную нисходящую, переходную, горизонтальную и глубинную зоны.

Растворяющая способность воды и растворимость минералов карстующихся пород

Растворимость — это способность соли переходить в раствор. Растворяющая способность воды, или ее агрессивность, определяется недонасыщением или емкостью раствора, т. е. дефицитом насыщения. Растворимость минералов, образующих карстующиеся породы, при температуре 25° С в дистиллированной воде следующая: NaCl — 320, $CaSO_4-2,1$, $CaCO_3-0,015$ г/л.

Растворимость зависит от многих факторов — температуры, давления, состава растворителя. Д. С. Соколов проанализировал зависимость растворения от величины энергии кристаллической решетки, структуры и размеров кристаллов, а также наличия примесей. Растворимость $CaCO_3$ зависит главным образом от содержания в воде CO_2 (табл. 2).

 $T\ a\ б\ \pi\ u\ ц\ a\quad 2$ Растворимость CaCO $_3$ в присутствии CO $_2$ при T 17° по Тильмансу и Шеперкло [36]

р СО2, атм	Свободная СО2, мг/л	СаСО ₃ , мг/л
0	0	11
0,00063	1,0	68
0,00159	3,0	114
0,00317	6,0	148
0,00489	9,25	170
0,0130	25,0	227
0,0286	54,0	284
0,0545	103,0	352
0,0818	154,5	409
0,1055	199,5	455

Растворимость CO_2 в воде в десятки раз превышает растворимость кислорода, азота и метана. Повышение температуры значительно снижает растворимость CO_2 в чистой воде.

Зависимость между растворимостью и парциальным давлением углекислого газа над жидкостью при его невысоких значениях весьма близка к прямо пропорциональной. При высоких значениях давления газа эта зависимость нарушается. По данным В. М. Левченко, растворимость СО₂ снижается по мере роста концентрации солевых растворов. Повышение температуры существенно снижает кальцитовую емкость углекислых вод.

А. И. Бунеев и Ф. Ф. Лаптев отмечали увеличение карбонатной агрессивности вод, содержащих углекислоту, при их смешивании. Оно способствует выщелачиванию в местах пересечения трещин, где происходит смешение вод разного состава. В дальнейшем роль коррозии смешивания в карстообразовании была рассмотрена А. Бёгли.

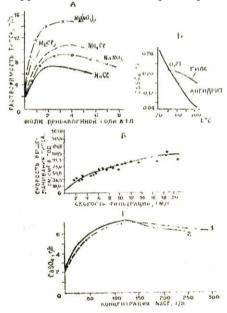


Рис. 6 . А – растворимость гипса в водных солевых растворах при 25°C (по Э. Б. Штерниной); Б – кривые растворимости гипса и ангидрита при 20–100°С (по А. Е. Хиллу); В – график зависимости между скоростью фильтрации скоростью выщелачивания гипса B. Г. Науменко); Γ зависимость величины растворимости CaSO₄ от концентрации растворов NaCl (1 - по Э. Б. Штерниной и Е. В. Фроловой, 2 – по Н. В. Кудряшовой)

Наличие в воде растворенной соли, не имеющей общего иона с твердой фазой, повышает растворимость последней. Растворимость СаСОз в насыщенном растворе NaCl меньше, чем в растворах более низкой концентрации, но больше, чем в чистой воде. Растворы солей, имеющих общий ион с твердой фазой, понижают растворимость последней.

Растворимость сульфатов кальция в дистиллированной

воде значительно выше растворимости карбонатов кальшия. Соотношение растворимости ангидрита и гипса меняется с увеличением температуры. Ниже 42°C растворимость ангидрита выше чем гипса (рис. 6 Б), что соответствует несколько меньшей величине энергии решетки ангидрита. При более высоких температурах указанных растворимость минералов обратной находится зависимости. По-видимому, это связано с неустойчивостью гипса при высоких температурах, т. е. расшатыванием и распадом тех связей, которые существуют в решетке гипса между молекулами воды и ионами Са и SO₄. Растворимость гипса увеличивается в интервале температур 0-40°. При дальнейшем повышении температуры она растворимости снижается. Снижение C ростом температуры наблюдается и у ангидрита.

Скорость растворения гипса возрастает с увеличением скорости движения потока растворителя (рис. 6 В). Влияние концентрации растворов NaCl на растворимость $CaSO_4$ при $T=25^{\circ}C$ иллюстрируется на двух кривых (рис. 6 Γ). Гипсовая емкость воды под влиянием NaCl сначала быстро увеличивается, достигая максимума при концентрации 130–140 г/л NaCl, а затем очень медленно уменьшается, оставаясь, однако, даже при очень высокой концентрации NaCl более значительной, чем емкость дистиллированной воды. На рис. 6 А показана растворимость гипса в водных растворах различных солей при $T=25^{\circ}C$ (по Э. Б. Штернйной).

Растворимость солей возрастает с увеличением давления. По данным Е. В. Посохова, растворимость солей увеличивается с повышением давления на $100~\rm k\Gamma c/cm^2$: $CaCO_3$ — на $7.5~\rm \%$, $CaSO_4$ —7.7, $CaSO_4$ 2 H_2O — 5,7. В. И. Манихин приводит данные о растворимости ангидрита в зависимости от

Таблица 3 Растворимость CaSO₄ в воде (г/1000 мг раствора) в зависимости от давления и температуры (по В. И. Манихину)

	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	• /	
Давление, кГс/см ²	Температура		
$\kappa\Gamma c/cm^2$	30°	40°	50°
1	2,5	2,2	1,9
500	3,8	3,7	4,5
1000	8,4	7,0	10,0
2000	14,6	13,0	17,0
3000	19,0	21,0	30,0

давления и температуры (табл. 3). Влияние давления на гипсово-ангидритовый карст незначительно, так как гипс и ангидрит карстуются обычно на глубине менее 100–150 м.

Растворимость NaCl возрастает с увеличением температуры, оставаясь высокой в интервале 0–100°С.

Вследствие изменения растворяющей способности природных вод в зависимости от различных факторов карст активизируется в зонах крупных нарушений, где происходит смешение вод разного химического и газового состава, в местах разгрузки глубинных хлоридно-натриевых или сульфатно-натриевых и термальных углекислых (в случае карбонатного карста) вод, на контактах пород различного литологического состава.

КЛАССИФИКАЦИИ КАРСТА

Вопрос о выделении типов карста является одним из основных в карстоведении. Типизация карста создает теоретическую основу районирования областей карстовых И их опенки для целей. инженерно-геологических И. Цвийич 1918 г. [51] R охарактеризовал лва основных И переходный типы карста, гидрографией, различающиеся рельефом, почвенным частично, растительностью и. влиянием на хозяйственную деятельность человека. Это холокарст, или полный карст, в «котором развитие всех карстовых форм и подземной гидрографической сети достигло совершенства», и мерокарст, или несовершенный карст, когда карстовые явления не получили полного развития. Указанное деление карста долгое время использовалось в карстоведческой литературе (Р. Кеттнер, И. Кунский, Я. Миховска и др.).

Начиная с 30-х до второй половины 60-х гг. в связи с развитием климатической геоморфологии появляются классификации карста по климатическому показателю (работы Г. Леманна и его учеников). Со второй половины 60-х гг. отмечается комплексный подход к выделению типов карста (В. Панош, Я. Якал, Ф. Д. Миотке, М. М. Свитинг и др.). Типизация карста все в большей степени выступает основой районирования карстовых областей для целей их хозяйственного освоения. Комплексный подход к типизации карста отличает исследования советских географов и геологов (М. А. Зубащенко, Н. А. Гвоздецкий, Г. А. Максимович, Б. Н. Иванов, А. Г. Чикишев, А. В. Ступишин и др.).

Под типом карста понимается совокупность геологических, гидрогеологических и морфологических особенностей признаков) карстующегося массива, определяющих развитие

карста. При выделении типов карста многие авторы используют один из признаков. Н. И. Соколов различает 61 тип карста на основе 12 признаков: 1) геотектонических условий, 2) относительной мощности карстующегося 3) положения карстующегося массива. относительно базиса эрозии, 4) степени закрытости карстующегося 5) литологического состава, 6) характера агрессивного 7) характера пустот, служивших первичными путями фактора, проникновения вод, 8) степени однородности карстующегося массива, 9) преобладающего направления движения агрессивных 10) степени развития подземной гидрографии, 11) сочетания карста с другими явлениями, 12) возраста карста. Все эти признаки должны учитываться при изучении карста той или иной территории, хотя только некоторые них МОГУТ служить классификационными. Г. А. Максимович [26] дополняет перечисленные признаки такими, как вызывающие карстовые явления. активность морфометрические признаки.

В. Панош [64] к типологическим признакам классификаций относит: 1) геолого-тектонические, 2) геоморфологические, 3) климатические и климато-геоморфологические, 3) гидрологические, 5) биологические, 6) региональные. И. Гаме [67] классифицирует карстовые области по составу и мощности покровных отложений, положению уровня карстовых вод относительно земной поверхности.

В советской литературе чаще всего используется классификация карста по степени обнаженности карстующихся пород, генезису и составу покровных отложений (М. А. Зубащенко, Н. А. Гвоздецкий, А. Г. Чикишев, Г. А. Максимович, З. К. Тинтилозов, Р. А. Цыкин и др.). Покровные отложения отражают геологическую историю данного участка, физико-географические условия, современные и древние. Г. А. Максимович по данному признаку охарактеризовал 6 типов карста: 1) голый (средиземноморский), 2) задернованный (кавказский), 3) покрытый (среднеевропейский), 4) перекрытый подаллювиальный (камский), 5) закрытый (русский), 5) подвулканический (среднеатласский); затем - еще два типа - зеленый (кубинский) и обнаженный (среднеазиатский. Термин «покрытый, среднеевропейский», карст Л. Савицкий в 1909 г. применил к районам, где карстующиеся породы покрыты элювием, т. е. продуктами их выветривания. Н. А. Гвоздецкий выделил задернованный карст на карстующихся породах Кавказе, где на почвенно-дерновой слой. М. А. Зубащенко изучил закрытый, или восточно-европейский, тип карста в районах Русской равнины, в которых карстующиеся породы бронированы коренными

некарстующимися. В случае, когда карстующиеся породы были вначале вскрыты эрозией, а затем перекрыты аллювием, карст назван (Γ . А. Максимович) перекрытым подаллювиальным, а при наличии в их кровле эффузивов — подвулканическим.

Термин «зеленый карст» заимствован из зарубежной литературы. Карстующиеся породы покрыты древесной растительностью в условиях тропического, реже — субтропического, влажного климата. Обнаженный (среднеазиатский) карст в пустынях Средней Азии впервые был описан А. М. Овчинниковым. Он исследован А. А. Алимовым в Центральных Кызылкумах и Нуратинских горах. Состав, мощность, генезис покровных отложений, условия их залегания на карстующихся породах отражают историю развития карста данной карстовой области.

Н. А. Гвоздецкий [5] в основу классификации карста положил морфолого-генетический и литологический признаки. По первому признаку им выделены следующие типы карста: погребенный (ископаемый); бронированный (развиваются под покровом твердых скальных и полускальных пород); покрытый под покровом рыхлых некарстующихся, генетически не связанных с карстующейся породой отложений; задернованный; полузадернованный; голый; сочетающийся с вечной мерзлотой; останцовый тропический. В понятие «покрытый» Н. А. Гвоздецкий вкладывает иное содержание по сравнению с другими исследователями.

Согласно литологической классификации существуют известняковый, доломитовый, мраморов, мела, мелоподобных мергелей, гипсо-ангидритовый, соляной карст. Совмещением обеих классификаций устанавливаются основные типы карста СССР, которые образуют два класса — равнинный и горный карст.

Карст – это сложный природный процесс, зависящий от условий и факторов природной среды. Выделенные типы должны отражать основные геологические и климатические обстановки карстообразования (рис. 7). При классификации карста должны быть приняты во внимание климатические условия, роль которых в карстообразовании показана Г. Леманном, Ж. Корбелем, Л. Якучем. Во влажном тропическом климате при расчлененном рельефе и отсутствии сплошного почвенного покрова на поверхности карстующихся пород наблюдается кустарниковая и древесная растительность (зеленый карст). В горных районах с расчлененным рельефом в условиях влажного умеренного или субтропического климата элювий смывается с поверхности коренных пород в трещины и поноры (голый карст). В этих же геоморфологических

условиях, но при умеренно-влажном климате, на поверхности карстующихся пород формируется почвенный покров (задернованный карст). В горных пустынных областях карстующиеся породы обнажены (обнаженный карст). На равнинах и плато при неглубоком расчленении в условиях умеренно-влажного климата формируется в результате выветривания элювий, покрывающий карстующиеся (покрытый карст). Подаллювиальный перекрытый карст характерен для долин равнинных рек, где развиты аккумулятивные террасы. На равнинах, подвергавшихся четвертичному оледенению, карстующиеся карстовые формы были перекрыты породы и доледниковые ледниковыми отложениями (перекрытый подморенный карст).

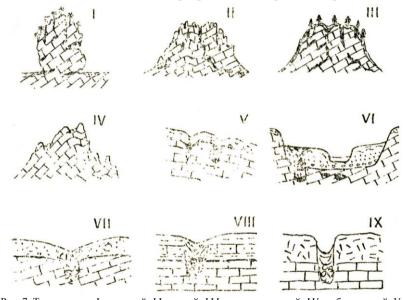


Рис. 7. Типы карста: I – зеленый, II – голый, III – задернованный, IV – обнаженный, V – покрытый (подэлювиальный), VII – перекрытый (подаллювиальный), VIII – перекрытый (подморенный), VIII – закрытый (бронированный осадочными породами), IX – закрытый (бронированный вулканическими породами – подвулканический)

Развитие карста определяется не только азональными структурно-геологическими, но и зональными физико-географическими (климатическими) условиями. В основу типологического районирования карста больших территорий могут быть положены принципы инженерно-геологического типологического

TITO .		U		
т ипы	капстовых	территорий	пязного	VNORHS
	peroppin	- cpp op	p	J PO 25

	Геоструктурные единицы			
Зональные	Класс (платформы, орогены)	Подкласс (по возрасту платформ или по	Тип (по глубине залегания фундамента	
климатические единицы		строению основания орогенов)	платформ и возрасту складчатого	
Пояс (арктический,	Магатин каралариу		основания орогенов)	
субарктический,	Мегатип карстовых территорий			
умеренный, субтропический,				
тропический)				
Область по тепло- и влагообеспеченности		Мезатип карстовых территорий		
Зона по наличию или			Тип карстовых	
отсутствию			территорий	
мерзлоты				

районирования, разработанные Е. М. Сергеевым и Е. Б. Ершовой. Авторы учитывают две ведущие группы факторов, что определяет выбор двухрядной перекрестной классификации с построением независимых систем таксономических единиц: одной — по геолого-структурным, другой — по зональным классификационным признакам.

За таксономические единицы геоструктурного ряда принимаются структуры разного типа и порядка, в качестве единиц второго ряда – климатические пояса, климатические области и зоны по температурному состоянию пород (табл. 4). Например, к мегатипу карстовых территорий относится тропический орогенный останцовый карст. Карст зоны разбития многолетней мерзлоты холодных областей умеренного пояса платформ и орогенов может быть выделен в особый тип карстовых территорий. Каждый тип закарстованных территорий характеризуется определенными закономерностями развития карста, выявление и учет которых открывает путь к более рациональному использованию их ресурсов.

МОРФОЛОГИЯ КАРСТА

Гидродинамическая зональность карстовых форм

Систематизация карстовых форм содержится работах А. А. Крубера, И. К. Зайцева, Н. А. Гвоздецкого, Д. С. Соколова, Г. А. Максимовича и др. Г. А. Максимович [26] относит скульптурные карстовые формы и воронки различного генезиса к разным гидродинамическим зонам. Д. С. Соколов [36] делит все формы на образующиеся 1) в растворимых породах и 2) породах, покрывающих закарстованные толщи или примыкающих к ним. Морфология карста зависит от литологических (карбонатный, сульфатный, соляной карст), структурно-геоморфологических (горный, равнинный), климатических условий, типа карста (голый, задернованный, покрытый), его возраста. Например, карры типичны для областей голого горного карста, воронки являются основной формой в областях покрытого, закрытого и перекрытого карста равнин.

Генезис карстовых форм в значительной степени определяется условиями движения карстовых вод. В массивах со значительной мощностью карстующихся пород каждой гидродинамической зоне соответствуют определенные карстовые формы. В зоне поверхностной подзоне интенсивной трешиноватости вертикального нисходящего движения карстовых вод образуются карры, поноры, рвы, воронки, котловины, карстовые лога; в зоне вертикальной циркуляции - колодцы, шахты, вертикальные пещеры; в зоне сезонных колебаний и зоне горизонтальной циркуляции горизонтальные и наклонные пещеры. Днища наиболее крупных карстовых форм – польев – располагаются приблизительно на уровне зоны горизонтальной циркуляции карстовых вод. Каждому типу карста присущи определенные комплексы поверхностных и подземных форм. Рассмотрим наиболее распространенные карстовые формы.

Карры

Это различного рода углубления, разделенные выступами карстующихся пород, относящиеся к микроформам, редко — мезоформам. Они типичны для голого и задернованного карста, но встречаются как погребенные в условиях покрытого карста. Карры характерны для известняков, отмечены в гипсах и солях, но не свойственны отложениям доломита и мела. Глубина карровых понижений составляет обычно до $0.5\,$ м, иногда — 3-6, реже — $12.\,$ Карры встречаются на различных высотах, от уровня моря до высочайших известняковых

вершин в разнообразных климатических условиях. Первоначально были описаны карры в Альпах, где их называют также шратты (нем.) и лапиес (франц.).

Генезис и типология карров освещены в работах А. Бёгли, Ф. Бауэра, Ф. Д. Миотке [61], Д. Форда и др. В отечественной литературе наиболее полно эти формы рассмотрены А. А. Крубером, А. С. Барковым, Н. А. Гвоздецким [4], Г. А. Максимовичем [26], 3. С. Султановым и др.

В. Панош [65] считает факторами формирования карров характер химических реакций в известняках при взаимодействии их с водой и углекислым газом, количество и распределение атмосферных осадков, состав и структуру пород, наклон поверхности, наличие почвенного и растительного покрова, эволюцию климата. Большую роль коррозии смешивания каррообразовании А. Бёгли отволит атмосферной, талой и воды из растительного покрова. Типичные карры развиты в высокогорных областях Европы, где их образование связано не только с дождями, но и талыми снеговыми и ледниковыми водами, а также в карстовых областях влажных субтропиков, для которых характерны ливни. В последнем случае особое значение приобретают турбулентный характер движения воды и неравномерное растворение известняка.

На развитие карров влияют состав, структура, текстура породы, густота трещин. Сильно трещиноватые породы разрушаются механически и не образуют карров. При наличии растительности возникают округлые карры. В. Панош типизирует карры по четырем морфологическому, признакам: стадии развития, обстановке возникновения, положению в пространстве. По морфологии карры разнообразны. Это карровые камни или карстолиты (обломки выпуклых частей карров), микрокарры (диаметром и глубиной менее 1 мм), пикообразные, грибообразные, луночные, кавернозные (выступы полостями), корневые, меандрирующие, мисочные, пронизаны трещинные, бороздковые, столовые, терковидные, колодцеобразные, шлаковидные, следообразные, сотовые и другие карры.

Исходя из стадии развития, можно выделить несколько типов карров. Первичные, или микрокарры, — микроскопические выпуклые и вогнутые формы, возникшие в результате селективной коррозии поверхности карстующихся пород, происходящей под воздействием атмосферных осадков, талых и конденсационных вод и биогенного выветривания. Это в основном терковидные и сотовые карры. Редкий тип карров в виде выступов кристаллов гипса (более 3 см) в Буковинском

Приднестровье описан Н. А. Куницей и В. Н. Андрейчуком.

Голые карры представляют собой результат коррозионного воздействия атмосферных и талых вод, свободно стекающих по поверхности растворимых пород. Деградированными называются карры, выпуклые и вогнутые части которых сильно разрушены или распались на обломки – карстолиты. Эксгумированные карры образуются в результате удаления продуктов выветривания и биогенеза из карровых понижений. Инверсионные карры – это карры, выпуклые сцементированными продуктами которых сложены выветривания, заполнявшими понижения первичных карров. При денудации первичной карровой поверхности сцементированные продукты были отпрепарированы в виде выступов. Покрытые карры возникают в кровле карстующихся пород под проницаемыми образовании отложениями. Большую роль в их приобретает биохимический фактор. В полупокрытых каррах выступы породы поднимаются среди продуктов выветривания.

К обстановкам образования карров относятся горы, плато, побережья морей, останцы, атоллы, обвально-оползневые блоки, пещеры и др. Поверхность, на которой формируются карры, может занимать различное положение в пространстве (склон, подошва склона, вершина возвышенности, потолок, пол, стенки пещеры и др.).

Карры являются первичными формами выщелачивания пород, отражающими их состав, структуру, текстуру и трещиноватость. С. Т. Традгилл в результате детальных исследований редких ножевидных карров на атолле Альдабра установил, что избирательная коррозия пород связана с различием размера зерен, их минералогии, способности к растворению и скорости растворения. Последний фактор приобретает важное значение в условиях быстрого стока тропических ливневых вод. В развитии некоторых карров большую роль приобретает биологический фактор (главным образом лишайники и водоросли). Г. Перна и У. Сауро описывают в карстовой области Венеции микрокарры в местах скопления микроорганизмов.

Д. Ландберг применил особый метод изучения карровых борозд района башенного карста Чиллаго (Австралия). Для 1174 карровых борозд на поверхности силурийских и девонских известняков с помощью специального устройства измерялись ширина, глубина, угол между стенкой борозды и вертикальной плоскостью. Предложенный метод допускает использование ЭВМ для статистической обработки морфологических данных. Он позволяет получить объективные критерии

для создания модели развития карров в районах с различными литологией и климатом. Условия формирования карров карстовой области Пикос-де-Эуропа (Испания) по данным морфологического, физико-химического и экспериментального изучения рассмотрены Ф. Д. Миотке [61].

Большой интерес представляют ископаемые карры в подошве залежей бокситов, фосфоритов и других полезных ископаемых. При исследовании карстовых районов желательно детальное изучение микроформ выщелачивания, что позволит глубже понять характер взаимодействия породы с водой.

Поноры

Это вертикальные каналы с поперечником в верхней части до 0,5, реже — 1 м, на глубине переходящие в трещины. Они бывают щелевидные, цилиндрические и воронкообразные. Часто поноры располагаются на дне воронок, иногда — в руслах рек. Они могут быть заполнены крупнообломочными продуктами выветривания или аллювием. Через поноры атмосферные осадки, временные й постоянные водотоки проникают в глубь пород.

Различные типы поноров в карстовых областях Западного и Южного Тянь-Шаня описаны М. М. Маматкуловым [28]. Поноры-щели представляют собой расширенные фрагменты трещин, длина которых достигает 150 см при ширине 5–10 см, глубина наклонных — 2–5 м, вертикальных — 10, коленчатых — 3–4. На глубине они переходят в трещины. Поноры-щели характерны для известняков, оказываясь часто приуроченными к трещинам бортового отпора. Колодцеобразные поноры имеют поперечное сечение в виде многоугольника или круга. В юго-западных отрогах Гиссарского хребта они встречаются в гипсах и солях. Диаметр входных отверстий достигает 50 см, глубина — 5 м. Воронкообразные поноры расположены обычно на дне воронок. Диаметр их отверстий 0,4–1 м, глубина до 2 м, причем по мере углубления они переходят в трещины.

Карстовые колодцы

Это колодцеобразные вертикальные каналы с поперечником от 1–3 до 5 м и глубиной, условно принятой за 20 м (рис. 8). В. Н. Дублянский [11] относит к колодцам формы, у которых глубина больше ширины и длины у входа. А. Б. Климчук и другие [19] не разграничивают колодцы и шахты, относя к первым простые одноэлементные вертикальные полости, а ко вторым – сложные полости, состоящие из нескольких

колодцев и соединяющих их форм. Авторы не учитывают геологические и гидрогеологические различия формирования колодцев и шахт. Колодцы приурочены к верхней, наиболее трещиноватой части массива, зоне интенсивного выветривания. Шахты образуются в более глубоких зонах с постоянным температурным режимом вдоль крупных тектонических трещин и разломов.

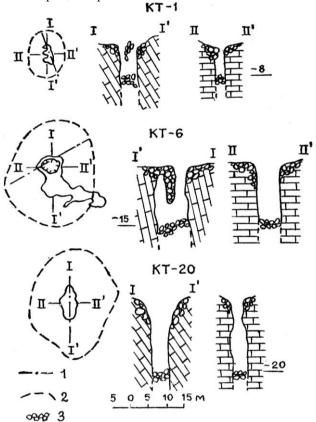


Рис. 8. Карстовые колодцы массива Кырктау (по А. Б. Климчуку и др.): I – тектоническая трещина; 2 – контуры каррового поля; 3 – глыбы

Карстовые колодцы по происхождению подразделяются на коррозионные (как результат коррозии, выветривания, эрозии стенок вертикальных каналов, обусловленной стекающей

36 Labora

водой), нивально-коррозионные (как следствие коррозии, возникающей под воздействием талых снеговых вод, морозного выветривания), гравитационно-провальные (результат обрушения постепенного смешения кверху свода подземной последующим ее вскрытием на поверхности). Т. 3. Кикнадзе [18] описывает пять морфологических типов колодцев на массиве Арабика, большая часть которых коррозионно-нивальное из имеет происхождение.

Карстовые шахты и пещеры

В спелеологии нет единого понимания термина «шахта». В. Н. Дублянский относит к ним полости, у которых глубина больше 20 м и больше ширины и длины у входа. По З. К. Тинтилозову [38], шахта — это вертикальная полость с меняющимся поперечником и обязательным переходом вертикального ствола в заловидные расширения (иногда на разных уровнях), часто имеющие большие размеры. Сложные системы глубиной в несколько сотен метров он называет пропастями.

- Г. А. Максимович [26] относит к шахтам вертикальные полости глубиной более 20 м, подразделяя их на неглубокие (20–50 м формы, переходные от колодцев к шахтам), обычные (50–250 м), глубокие (250–500 м), очень глубокие (500–1000 м) и глубочайшие (более 1000 м). Шахты с расширенным устьем он называет пропастями, а более сложные системы, состоящие из вертикальных фрагментов, чередующихся с наклонными или почти горизонтальными участками вертикальными пещерами. На рис. 9 приведена классификация шахт И. Гамса [67].
- Г. А. Максимович подразделял шахты по происхождению на два основных типа: 1) коррозионные, образованные в результате в основном растворения, частично химической и механической эрозии, подземного выветривания, гравитационных процессов, в зоне нисходящего движения карстовых вод (а) и в области разгрузки напорных холодных карстовых, минеральных и термальных вод (б); 2) провальные, формирующиеся вследствие обрушения сводов полостей в зоне ненапорных карстовых вод (в) и напорных, в основном термальных и минеральных (г).
- В. Н. Дублянский все генетическое разнообразие подземных полостей сводит к трем классам: 1) коррозионно-гравитационному преимущественно с дождевым и снеговым питанием (90 %), частично конденсационным (10 %); 2) нивально-коррозионному с дождевым и снеговым питанием (100 %); 3) коррозионно-эрозионному с инфильтрационным

(20–35 %), инфлюационным (50–70 %) и конденсационным (10–15 %) питанием. В этой классификации не учтены провальные и коррозионные полости в зонах разгрузки напорных холодных, термальных и минеральных вод.

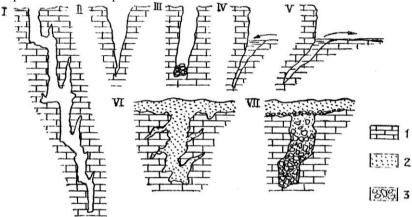


Рис. 9. Типы карстовых пропастей (по И. Гамсу) : I — ступенчатая, II — воронкообразная; III — цилиндрическая, IV — водопоглощающая, V — родниковая, VI — погребенная, VII — ископаемая; I — известняк, 2 — глинистые отложения, 3 — обломочные отложения

Преимущественно вертикальные шахты и колодцы на глубине могут переходить в наклонные или горизонтальные пещеры (рис. 10). Вопросы терминологии, морфометрии, генезиса и классификации карстовых пешер И шахт рассмотрены В. Н. Дублянским В. В. Илюхиным [11]. По данным В. Э. Киселева, глубочайшими в мире являются шахты Жан Бернар – 1535 м (Франция), Снежная – 1370 м (СССР, Кавказ), Пьер Сен Мартен – 1342 м (Франция–Испания); длиннейшими – пещеры Флинт-Мамонтова – 471000 м (США), 151000 м (CCCP), Хельлох 149000 м Оптимистическая (Швейцария). Для крупнейших пещер и шахт СССР характерны древовидность (Красная пещера, шахта Назаровская), меандрирование галерей, уступы в продольном профиле (шахты массива Алек на Кавказе), эрозионные котлы на дне, эрозионные желоба на стенках, водно-аккумулятивные отложения, автохтонные, как так И аллохтонные.

Исследование пещер представляет большой интерес для геологов (изучение трещиноватости, тектонических нарушений, подземного выветривания, выщелачивания и минералообразования,

устойчивости пород), гидрогеологов (процессу конденсации, инфильтрации, инфлюации, формирования химического состава подземных вод, их ресурсов), биологов (биохимические процессы, жизнь под землей), медиков (лечебное



Рис. 10. Система Пьер Сен-Мартен [11]

воздействие спелеоусловий и спелеофакторов на организм человека, медико-биологические эксперименты в замкнутом изолированном пространстве). Пещеры являются прекрасными объектами туризма (Ново-Афонская, Кунгурская и др.).

Советская спелеология в последнее десятилетие достигла больших успехов. В СССР открыто и исследовано 49 полостей глубиной более 200 м и 24 пещеры протяженностью более 5000 м (данные А. Б. Климчука и В. Э. Киселева).

Карстовые воронки

блюдцеобразные, Карстовые воронки чашеобразные, конусообразные, цилиндрические понижения диаметром до 100 м и глубиной до 25 м. На основе исследования 2800 воронок в карстовых районах Пермской области предложена следующая морфометрическая классификация их. По диаметру выделяются небольшие (< 5 м). обычные, т. е. наиболее распространенные (5-25), большие (25-50), очень большие (> 50); по глубине - мелкие (< 1 м), обычные (1-5), глубокие (5–10), очень глубокие (> 10). В отдельных карстовых районах описаны и измеряны тысячи воронок, Рязано-Охлебининском районе Башкирии – 11567, на Полазненском полуострове Пермской области – 5000, в Кишертско-Суксунском районе – 1930, на Иренском участке Кунгурско-Иренского района – 8615. В США на северо-востоке штата Айова в известняках силура и девона зафиксировано 12700 воронок [56], причем наибольшая

закарстованность отмечается на площадях, где мощность покровных отложений не превышает 9 м.

Для оценки размеров воронок прибегают к статистической обработке данных о их диаметре и глубине. Представление о размерах воронок дают графики распределения воронок и провалов в зависимости от величины их диаметра и глубины (рис. 11). Для построения дифференциальной кривой

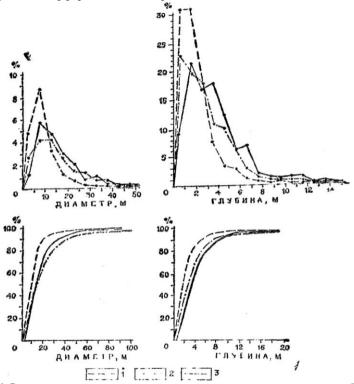


Рис. 11. Распределение карстовых воронок в зависимости от их поперечника и глубины для района карбонатного карста: I — Усьва; сульфатного карста. 2 — Полазна, 3 — Посад (Пермская область)

распределения на оси абсцисс откладываются интервалы, принятые для диаметров 5 м, глубин 1 м, на оси ординат — процент их повторяемости. Интегральную кривую получают, нанося те же данные на ось абсцисс и суммы процентов — на ось ординат.

А. В. Ступишин использует данные о верхнем диаметре

и глубине для выделения морфологических типов воронок. Морфологический показатель удобнее выражать отношением диаметра к глубине. У конусообразных воронок он менее 5, чашеобразных -5-10, блюдцеобразных -11-50. В плане различают воронки округлые (рис. 12), овальные, лопастные, сдвоенные, хвостатые с ложбинами и оврагами. Последние наблюдаются обычно в районах закрытого и покрытого карста или на контакте карстующихся и некарстующихся пород.

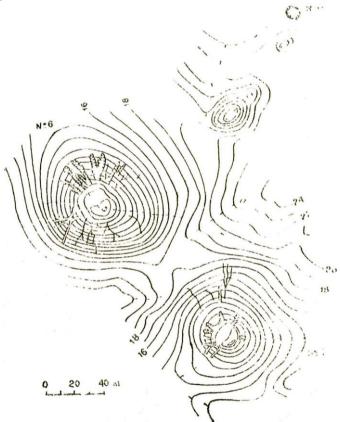


Рис. 12. Карстовые воронки, располженные в районе г. Дзержинска (по А. Н. Ильину). Заштрихована молодая конусообразная воронка

На Беломро-Кулойском плато приконтактные воронки с исчезающими водотоками имеют длину 70–100, ширину 30–60 и глубину 8–20 м. Водоток теряется в поноре у основания

гипсового уступа. В образовании таких форм большую роль играют эрозионные процессы. Склоны некоторых воронок осложнены оплывинами и оползнями.

Участки площадю обычно не более 2 км², покрытые воронками, называются карстовыми полями. Границы их определяют произвольно или путём нахождения минимальных обобщающих радиусов. Поля в плане могут быть линейными – вдоль трещин, литологических контактов, на дне логов; лентовидными – на склонах террас и долин; дуговидными и кольцевыми – вокруг останцов, рифов, локальных поднятий; ортогональными – по двум системам пересекающихся под прямым углом трещин.

Карстовые поля характеризуются следующими показателями. Плотность (P) — это количество воронок, приходящихся на $1~{\rm km}^2$. Коэффициент площадной закарстованности (K_s) — отношение суммы площадей воронок к площади поля (8~%). Коэффициент карстовой денудации (K_d) — отношение суммы объемов воронок к площади поля $(8~{\rm km}$ или cm).

Таблица 5 Плотность воронок и коэффициенты закарстованности в районе с. Ключи (Пермская область)

Карстовое поле	Количество воронок	Плотность, в/км ²	K _s , %	К _d , см
1	181	117	8,1	50,5
2	69	27	2,7	7,2
3	111	99	4,8	37,0
4	143	381	22,0	146,0

Эти показатели используются при количественной оценке закарстованных территорий (табл. 5). Наибольшие плотности (до $1000~\rm B/km^2$), коэффициенты площадной закарстованности (до 20—40~%) и карстовой денудации (до $1,5~\rm M$) характерны для гипсового и карбонатно-гипсового карста. Карбонатный карст отличается, как правило, меньшими величинами показателей. При изучении карстовых районов составляются различные типы карстологических карт, в частности, плотности карстовых форм. На форму и размеры воронок, их плотность, коэффициенты закарстованности влияют состав пород, их мощность, условия залегания, наличие в них прослоев других пород, трещиноватость, мощность и

состав покровных отложений, рельеф, неотектонические движения, возраст карста, гидродинамическая обстановка и др.

Связь формы и размеров карстовых воронок с вещественным составом карбонатных пород показана Л. П. Задорожной на примере юго-западной части Горного Крыма. С помощью статистических методов были обработаны материалы измерения более 2000 воронок в трех текстурных группах известняков: а) неслоистых и толстослоистых; б) среднеплитчатых; в) тонкоплитчатых с прослоями листоватых. Наиболее вытянутые воронки встречаются в тонкоплитчатых известняках, наиболее глубокие — в неслоистых и толстослоистых. Максимальные значения отношения диаметра к глубине выявлены для первых, минимальные — для вторых. Полученные средние величины размеров воронок могут быть использованы при подсчете площадных и объемных показателей закарстованности.

В карстовых районах Пермской области наибольшей плотностью воронок отличаются гипсы и ангидриты в пределах сводов локальных поднятий, где мощность покровных отложений меньше, а трещиноватость пород интенсивнее, контактов с карбонатными породами, склонов и присклоновых участков междуречий, вблизи логов. Плотность воронок на речных террасах уменьшается с возрастанием мощности аллювия.

По данным В. И. Мартина, на Уфа-Бельском междуречье, в районе г. Уфы, где гипсо-ангидритовая толща залегает под верхнепермскими отложениями, 85 % карстовых форм сосредоточено вдоль береговых склонов. Большая плотность воронок на склонах объясняется уменьшением мощности покровных отложений и наличием трещин бортового отпора. Увеличение мощности покровных отложений приводит к затуханию карста. В карстовых районах Башкирии при мощности покровной толщи более 60 м карст на поверхности не проявляется. Согласно М. А. Протасовой, на побережье р. Оки, в пределах Убежицкой структуры, при мощности покровных глинистых пород татарского яруса менее 20 м плотность воронок (конусообразных и чашеобразных) наибольшая, 20–30 м — карст незначителен, преобладают блюдцеобразные формы, более 30 м — карст практически отсутствует.

Многие исследователи отмечают приуроченность воронок к зонам тектонических нарушений. Согласно М. А. Абдужабарову, на плато Кырктау воронки сосредоточены вдоль разломов. Г. В. Чарушин и Г. П. Вологодский намечают три типа ассоциаций воронок в зависимости от господствующих систем трещин в Южном Приангарые: линейный. включающий иногла десятки воронок. — вдоль

господствующих систем трещин; ортогональный – вдоль параллельных систем трещин, пересекающихся под прямым углом; диагональный при пересечении трещин под острым углом. П. Хабич отмечает приуроченность воронок к тектоническим уступам в области Нотраньско (Динарский карст в Югославии), причем воронкам на поверхности соответствуют обвально-осыпные завалы в пещерах. В горах Агтелек (северная Венгрия) воронки и более крупные депрессии вытянуты соответственно простиранию тектонических структур или границ пород различного состава. Г. М. Потаповой для Южного Мангышлака установлена зависимость плотности, глубины и морфологии карстовых форм от неотектонической активности локальных структур.

В районах крупных пещер отмечена зависимость между размерами воронок и расположенных под ними гротов. На совмещенном плане Кунгурской пещеры и надпещерного поля прослеживается связь поперечника крупных воронок и ширины гротов [9]. В процессе формирования воронок продукты выщелачивания и покровные отложения перемещаются

Грот	Ширина грота, м	Поперечник воронки, м
Скандинавский	16	15
Крестовый	35	30
Хлебниковых	40	39
Заозерный	37	38

в гроты, отлагаясь под органными трубами в виде осыпей. Объем последних зависит от размера гротов и определяет объем воронок. По мере увеличения мощности покровных отложений связь между гротами, даже крупными, и воронками проявляется менее отчетливо. По данным Д. Н. Сабурова и других, на Беломоро-Кулойском плато органным трубам пещер соответствуют воронки на поверхности.

П. А. Балл рассматривает взаимосвязь пещер с воронками на примере Южного Уэльса (Англия). Подземные и поверхностные формы могут развиваться как самостоятельно, так и взаимосвязанно. В некоторых случаях отмечается прямая связь воронок и обвальных масс в пещере. Дождевые и талые воды, поглощаемые воронками, активизируют растворение пород и способствуют их обрушению в пещерах. Воронки могут стимулировать развитие глубинного карста и появление пробок из обломочного материала на глубине до 250 м ниже их дна.

Генезис воронок

Одна из наиболее полных генетических классификаций воронок разработана Г. А. Максимовичем [26] на основе детального изучения воронок Уфимского Плато и ряда провалов Пермской области, а также литературных Генезис воронок данных. ОН гидродинамическими зонами и типами карста. В верхней части зоны циркуляции (аэрации) вертикальной нисходящей голом задернованном образуются коррозионные карсте коррозионно-эрозионные воронки. закрытом. перекрытом (подаллювиальном) покрытом коррозионно-просадочные, коррозионно-провальные, коррозионно-суффозионные, коррозионноэрозионные, коррозионно-оползневые и полигенетические. В подзоне подвешенных вод, зонах переходной и горизонтальной циркуляции возникают провальные воронки независимо от типа карста, а в зоне сифонной циркуляции коррозионные воронки восходящих источников. Для поддолинного стока (перекрытый зоны подаллювиальный карст) характерны коррозионно-эрозионные воронки в местах поглощения рек или разгрузки карстовых вод.

Н. А. Гвоздецкий [6], а также ряд зарубежных исследователей все разнообразие воронок сводят к трем генетическим типам: 1) воронки поверхностного выщелачивания или коррозионные; 2) провальные или гравитационные воронки (образуются путем обрушения свода подземной полости); 3) воронки просасывания или коррозионносуффозионные (возникают посредством вмывания или проседания отложений в колодцы и полости карстующегося цоколя). Существуют переходные типы воронок — между типами вторым и третьим, а также коррозионно-эрозионные восходящих источников.

В основу классификации воронок необходимо положить два признака: характер деформаций земной поверхности и время формирования воронки, которые свидетельствуют о процессах, происходящих в карстующемся массиве.

Коррозионные воронки или воронки инфильтрационного и инфлюационного растворения карстующихся пород в поверхностной части массива. Они развиваются медленно, блюдцеобразных конусообразных до поглощающим понором на дне. В случае закупорки понора начинается регрессивное развитие воронки превращение заболачивание, заполнение делювием. Они характерны для голого, задернованного, покрытого карста с небольшой мощностью элювия. Примером является большая

часть воронок Горного Крыма, Уфимского плато, западного склона складчатого Урала, Кавказа.

Коррозионно-эрозионные воронки. В них впадают временные или постоянные водотоки. В половодье они заполняются водой, которая затем поглощается понорами. В эти периоды возрастает роль эрозии в формировании воронки.

П р о в а л ь н ы е в о р о н к и различных типов образуются путем обрушения сводов полостей, возникающих в карстующихся породах или перекрывающих их рыхлых отложениях. Условия образования провалов разнообразны.

1. Провалы, возникшие в результате обрушения блоков пород кровли подземной полости по трещинам при небольшой мощности покровных отложений над карстующимися породами или их отсутствии.

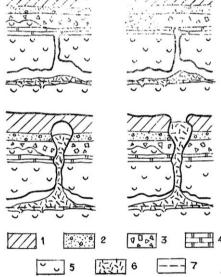


Рис. 13. Схема развития провала на цокольной террасе [24]: *I* – суглинок, 2 – песок с гравием и галькой, *3* – крупнообломочные отложения, *4* – доломит, *5* – гипс и ангидрит, *6* – обвально-осыпные образования, *7* – уровень карстовых вод

- 2. Провалы, обычно небольшого диаметра, развивающиеся над органными трубами пещер. Эволюция их показана на рис. 13 (по данным В. С. Лукина и Ю. А. Ежова) на примере Предуралья. Форма провалов цилиндрическая.
- 3. Провалы, возникающие при обрушении некарстующихся пород (рыхлых или скальных) в полость, формирующуюся в кровле карстующихся пород (рис. 14).
- 4. Провалы, являющиеся следствием обрушения кровли полости, возникшей в карстующихся породах, чаще в гипсах,

причем покровные отложения представлены породами различного литологического состава (рис. 15).

При наличии в кровле полости скальных пород (песчаников, мергелей, аргиллитов) провал длительное время сохраняет

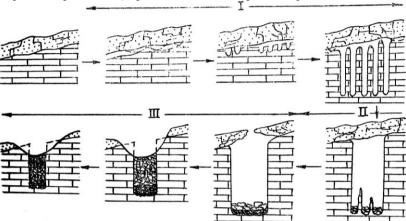


Рис. 14. Эволюция коррозионных полостей и провалов в районах с проницаемыми покровными отложениями в Южном Уэльсе (Англия) (по М. М. Свитинг)

крутые отвесные стенки и производит впечатление молодого. Примером является Кордонский провал в Предуралье. Если покровные отложения представлены рыхлыми грунтами, провал быстро эволюционирует от колодцеобразной формы к чашеобразной воронке. Примером является Бреховский провал, который возник в 1953 г. как шахта глубиной 46 м (поперечник 3×5 м), а уже в 1958 г. это была воронка диаметром 25 м и глубиной 12,5 м.

5. Провалы, возникающие при обрушении кровли формирующейся в рыхлых покровных отложениях в результате выноса грунта по трещинам, каналам в карстующиеся породы. Они образуются часто на террасах, где покровные отложения представлены суглинками, глинами, песками, галечниками. Вероятно к этому типу относится Кишертский провал (август 1949 г.) на 11 террасе р. Сылва, где мощность обводненного в нижней части аллювия превышает 20 м (Пермская область). Первичные размеры его составляли $50.5 \times 40.0 \times 9.0$ м (до воды). Скважины в районе провала вскрыли только небольшие полости, причем на глубине 90 м с галькой уральских пород. Ф. Р. Кеммерли [58]

изучил 30 провалов, возникших в элювии мощностью 3–21 м, покрывающем известняки нижнего карбона, на севере штата Теннесси (США). Во время ливней уровень карстовых вод поднимается выше кровли известняка. Вода увлажняет и размывает элювий, способствуя образованию полостей и обрушению их сводов.

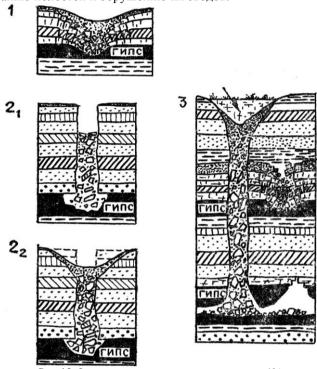


Рис. 15. Формирование коррозионно-провальных (1) и провальных (2, 3) воронок (по Ф. Д. Миотке). Пунктиром показан водоносный горизонт

Как уже отмечалось, первичная (провальная) полость может формироваться в различных зонах циркуляции карстовых вод в карстующихся породах или в перекрывающих их рыхлых отложениях. Геологические и гидрогеологические условия возникновения провалов разнообразны, что затрудняет создание теории провального процесса.

Первые теоретические исследования механизма карстовых провалов относятся к концу 40-х гг. (С. В. Альбов), Этим вопросам уделялось внимание на Международном

симпозиуме по инженерному карстоведению (Ганновер, 1973), научно-технических семинарах «Методика инженерных изысканий» (Дзержинск, 1978), «Моделирование формирования суффозионных и карстовых полостей» (Пермь, 1979).

В последнее десятилетие Дзержинская карстовая лаборатория ПНИИИС (с 1972 г.) и ЗапУралТИСИЗ успешно моделируют карстовые деформации в лабораторных условиях (рис. 16). На первом этапе моделировались деформации

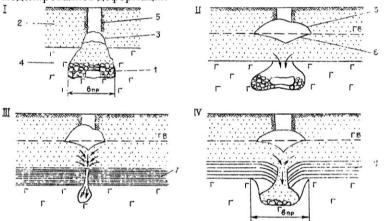


Рис. 16. Моделирование карстовых провалов (по Γ . Б. Давыдько и В. В. Толмачеву): I – полость в карстующихся породах, 2 – рыхлые грунты, 3 – свод в рыхлых грунтах, 4 – карстующиеся породы, 5 – провал, 6 – полость в водонасыщенных грунтах на уровне грунтовых вод (ΓB), 7 – трещиноватые породы, 8 – пластичные породы, I–IV – различные обстановки возникновения провалов

рыхлых грунтов, гипсов и глин кровли полости методом эквивалентных материалов. Было проведено несколько циклов экспериментов по выявлению влияния на устойчивость кровли полости состава слагающих ее грунтов, их мощности и трещиноватости. Установлено, что критическая величина пролета полости, при которой происходит обрушение, тем больше, чем больше мощность скальных или глинистых пород в кровле, чем менее они трещиноваты. На эту величину влияет вертикальная трещиноватость пород.

Механизм деформаций, возникающих в толще рыхлых неводонасыщенных грунтов над кровлей карстовой полости,

изучался на мелкомасштабных моделях, в качестве модельного материала использовался мелкозернистый слабоувлажненный песок. По мере расширения полости в основании модели в толще песков дискретно образовывался ряд сводов, причем каждый последующий оказывался более крутым, чем предыдущий. При большой глубине залегания полости крутизна «первичных» сводов при разных пролетах практически одинакова и очертание их близко к параболическому.

На третьем этапе моделировали деформации водонасыщенных песков над подземными карстовыми формами или трещинами (рис. 16, развитие помимо гравитационных II–IV). Ha их гидродинамические силы, которые проявляются там, где нарушается фильтрационно-гидродинамический режим. Если ширина карстовой полости, перекрытой водонасыщенными песками, меньше некоторой гравитационное критической величины, обрушение невозможно. В песках в случае нарушения сплошности водоупора, отделяющего трещинно-карстовые воды от надкарстовых, развиваются разуплотнение, разжижение, процессы, как суффозия, грунта. вязкопластичное истечение Возникающие полости вытягиваются вслед за поверхностью грунтовых вод. Завершается деформация оседанием или провалом поверхности. Возможны два пути формирования провала: непосредственный выход свода полости на поверхность и образование круглоцилиндрического провала в своде полости. В дальнейшем стенки провала оползают и выполаживаются.

Таким образом, эксперименты показали, что механизм возникновения провалов сложный, включающий различные процессы: растворение карстующейся породы, суффозию, разжижение и разуплотнение покровных грунтов, гравитационное обрушение. На основе изучения механизма карстовых провалов В. В. Толмачев и другие [39] предлагают их классификацию (табл. 6).

Коррозионно-просадочные воронки возникают в результате медленного проседания (прогибания) покровных некарстующихся отложений в полость, формирующуюся в кровле карстующихся пород,

Коррозионно-суффозионные воронки образуются путем суффозии рыхлых отложений в трещины или полости в кровле карстующихся пород. Формирование медленное, в условиях небольшой мощности рыхлых несвязных покровных грунтов.

Коррозионные (коррозионно-оползневые) воронки восходящих источников возникают медленно в течение десятков лет. Так, воронка в окрестностях с. Усть-Кишерть (Пермская область)

Таблица 6

Генетическая классификация провалов [39]

Тип провалов	Основные условия	Основные процессы механизма
тип провалов	образования	карстового провалообразования
Карстово обвальный	1. Наличие полости в	1. Формирование в покрывающие
	карстовых породах	породах обвальных полостей или
		разуплотненных зон
	2. Достижение	
	полостью предельного	2. Образование провала
	состояния	
Карстово-суффозионный	3. Наличие полости или	3. Перемещение покрывающих пород
	сильнотрещиноватой	в полости и трещины под действием
	зоны в карстовых	гидродинамических и
	породах	гравитационных сил
	4. Наличие	4. Формирование в покрывающих
	вертикальной	породах разуплотненных зон,
		суффозионных полостей и полостей
	вод в покрывающих	разжижения
	породах	
	L _	5. Последовательное формирование
	5. Достижение	обвальных полостей или
	скоростью фильтрации	разуплотненных зон над формами,
	критической величины	перечисленными в п. 4, п. 2
	СП	
	6. Покрывающая толща	
	сложена нескальными	
	породами	6.05
Смешанный	П.п. 1, 2, 4, 5, 6	6. Обрушение водонасыщенных
		покрывающих пород в полость
		П.п. 3, 4, 5
		П. 2

формируется около 30 лет. Из нее вытекает родник, расход его 10-12 л/с и минерализация 2,6 г/л. В июле 1978 г. размеры воронки были $21\times17.8\times3.6$ м. Она расширяется в результате отседания стенок по трещинам, оползания покровных отложений и последующего выноса материала родником за ее пределы. 30 октября 1983 г. на правом берегу родника наблюдалась неглубокая просадка округлой формы,

Эволюция возникающих воронок определяется их генезисом. Ф. Р. Кеммерли рассматривает изменение формы и глубины карстовой воронки в западной части возвышенности Рим (Теннесси, США) в течение 1500 дней со времени ее зарождения до достижения стабильного состояния. Воронка возникла в элювии, залегающем на известняках карбона, и вытянута по простиранию трещины. Скорость ее роста контролируется процессами растворения коренных пород, эрозии элювия, выноса растворенного и обломочного материала через понор, заполнения продуктами выветривания. Е. В. Колосов и О. В. Тычина установили, что 22 из 23 провалов в бассейне р. Оки имели цилиндрическую форму. Выделив фазы развития провальных воронок по форме, они определили их возраст: от свежих (1972—1980 гг.) до воронок старше 6000 лет.

При неглубоком залегании подземных вод провал заполняется водой. Скорость отступания стенок возникшего провала относительно первоначального положения зависит от многих факторов. Так, для сдвоенного провала в с. Усть-Кишерть (Пермская область) за 29 лет в среднем она составляет 0,5–0,6 м/год. В первые восемь лет скорость была 1,5–1,8 (табл. 7). Старые воронки могут омолаживаться за счет образования на их дне и склонах новых провалов. Часть воронок при кольматации дна водонепроницаемым материалом превращаются в озера.

Изменение размеров Кишертского провала, м

Д	ата замера	Длина	Ширина	Глубина до воды
	29.08.49	50,5	40,0-22,0	90
	10.07.57	64,5	52,3-27,6	7,7–7,9
	5.07.78	69,0	54,5	5,1-6,4

Воронки несут геологическую, гидрогеологическую, климатическую, биологическую другую информацию. И и А. Купцов [41] указывают на Ю. И. Хейнсалу возможность использования воронок Эстонской карстовой области для пополнения запасов трещинно-карстовых вод. В то же время через воронки может происходить загрязнение подземных вод. В районах с плохой обнаженностью карстовые воронки и лога часто имеют выходы пород, служащих маркирующими

Таблица 7

горизонтами при структурном картировании. По наличию воронок среди незакарстованной территории или по их полям кольцеобразной и дугообразной формы выявляются локальные положительные структуры. Полосчатое расположение асимметричных карстовых форм указывает на моноклинальное залегание пород, а линейное — на наличие разрывных нарушений.

Большой интерес представляет флора воронок, на основании анализа которой можно судить об эволюции растительности в данной Изучение состава и возраста заполнителей воронок изменении физико-географических судить позволяет об геологических условий. Л. Д. Эйдженброд сообщает об обнаружении мамонта отложениях карстовой воронки В г. Хот Спрингс (Южная Дакота). Древние ископаемые воронки являются коллекторами россыпных месторождений, огнеупорных глин, бокситов, железных руд и других полезных ископаемых.

Основной задачей в области изучения воронок представляется разработка генетической классификации их на основе новых данных с учетом геологических и гидрогеологических условий развития карста и результатов моделирования механизма не только провальных, но и других генетических типов воронок.

Карстовые котловины

Замкнутые карстовые понижения с поперечником от 100-200 м до 1-3 км и глубиной более 5-10 м относят к котловинам. Они имеют коррозионное, эрозионно-коррозионное, провальное происхождение. Моделирование котловин происходит при участии выветривания, оползания, поверхностной эрозии и других экзогенных процессов. Форма их в плане обычно вытянутая или сложная. Склоны и дно котловин осложнены воронками и понорами, в некоторых из них поглощаются небольшие реки или временные потоки. К. Г. Бутырина установила связь между плотностью воронок и количеством котловин в Полазненско-Шалашнинском карстовом районе Пермской области. На Беломоро-Кулойском плато котловины располагаются в верховьях крупных карстовых логов. Форма их округлая или вытянутая по направлению стока, дно неровное. Длина 100-500 м, ширина 50-70 м, глубина 8-30 м. Некоторые котловины заполнены водой. В Индерском районе котловины возникают на вершинах гипсовых холмов, представляющих собой купола с просевшими по-видимому, связано с выщелачиванием нижележащей соли. Для котловин характерно поглощение

поверхностного стока. В условиях влажного климата при кольматации трещин и поноров дна они заболачиваются и превращаются в озера (рис. 17).

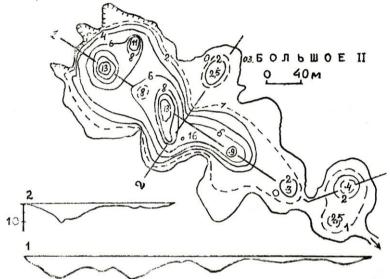


Рис. 17. Сложная озерная котловина (по К. Г. Бутыриной)

Карстовые лога

Карстовые лога – сильно вытянутые формы, замкнутые, с висячим устьем или открытые в речную долину, чаще всего эрозионно-карстового происхождения. В зависимости от положения дна относительно уровня карстовых вод они разделяются на три основные группы.

1. Подвешенные карстовые лога, являющиеся очагами поглощения поверхностного стока, образуются при слиянии ряда воронок. На западном крыле Уфимского вала описаны слепые, лога длиной до 400 м, заканчивающиеся крупными воронками с понорами. В Индерском районе, по данным С. С. Коробова и И. К. Поленова, встречаются короткие, но глубокие (10–12 м) овраги, образовавшиеся в результате слияния цепочки воронок на участках с незначительной мощностью покровных отложений, и эрозионно-карстовые овраги длиной 700–800 м и глубиной до 20 м на участках с большой мощностью покровных отложений (7–15 м).

При формировании последних в глубь массива вносится огромное количество рыхлого материала.

На дне крупных подвешенных оврагов возникают провальные воронки и овраги. В Южном Приангарье ущельеобразные карстовые овраги в пределах падей имеют глубину до 10 м, длину 150 м, ширину 5 м. Отвесные стенки их сложены чередующимися гипсо-ангидритами, доломит-ангидритами, реже — доломитами. Дно покрыто глыбами. По Г. П. Вологодскому, они образуются путем обрушения кровли узких полостей под днищами падей. В верховой и низовой частях провальные овраги переходят в пещеры-щели.

- 2. Мешкообразные пога замкнутым верховьем плато Беломоро-Кулойском имеют протяженность В среднем 300-400 м, глубину 20-50 м. Крутые склоны их сложены гипсами, осложнены оползнями. Верховье представляет обрыв гипса с глыбовой осыпью. Под глыбами иногда прослеживается ручей, который ниже течет по дну лога. Мешкообразные долины образуются путем обрушения сводов пещер от склона в глубь массива. Здесь же встречаются лога, верховья которых приурочены к контакту гипсов с красноцветами. Водоток, текущий по дну эрозионного лога, теряется в поноре на контакте с гипсами (Д. Н. Сабуров).
- 3. Крупные карстовые лога, на дне которых местами выходят родники. На Беломоро-Кулойском плато они протягиваются от речных долин или уступа плато на многие километры. Направление отдельных участков соответствует трещиноватости. Например, лог Карьяла в юго-восточной части плато имеет протяженность 10 км, дно его покрыто воронками, а прилегающие к логу залесенные пространства сильно закарстованы. В верховьях обнаружено пять пещер, причем некоторые с водотоками. На дне лога местами появляется водоток. В устьевой части из пещеры вытекает р. Карьяла.

Карстовые рвы

Карстовые рвы — это сильно вытянутые углубления с неровным дном, осложненным понорами и воронками. Они располагаются обычно в верхних частях склонов, в придолин- ных частях водораздельных пространств, реже — в суходолах или древних речных долинах. Впервые карстовые рвы в карбонатных породах были изучены А. Г. Лыкошиным и Д. С. Соколовым, в гипсах и ангидритах Беломоро-Кулойского плато — Д. Н. Сабуровым, Южного Приангарья — Г. В. Чарушиным и Г. П. Вологодским, Предуралья — В. С. Лукиным и

К. Г. Бутыриной, в карбонатно-сульфатных отложениях Поволжья — Н. Н. Лаптевой и А. В. Ступишиным.

В. С. Лукин выделяет в гипсово-ангидритовых отложениях рвы вдоль трещин бортового отпора и рвы над зонами интенсивного стока карстовых вод. Первые расположены в верхних частях крутых склонов или присклоновых частях водоразделов. Протяженность их 20–50 м при ширине от 1 до 15 м и глубине от долей метра до 10 м. Дно рвов обычно задерновано, на крутых склонах отмечены выходы коренных пород и глыбовые осыпи.

Карстовые рвы над зонами интенсивного подземного стока карстовых вод формируются в различных геоморфологических условиях: на склонах, в суходолах, присклоновых частях водоразделов. В Предуралье они отличаются большими размерами: длина 0,1–2,5 км, ширина 5–200 м, глубина от долей метра до 12 м. Большую роль в формировании рвов играют «бортовые потоки» на границе эрозионных и аккумулятивных террас, которые разгружаются в местах выклинивания аккумулятивных террас.

В развитии карстовых рвов выделяют три стадии. Первоначально на поверхности над трещинами бортового отпора или над участками интенсивного подземного стока появляются цепи воронок. На первой стадии группы слившихся воронок, с понорами, разделены перемычками. На второй стадии длина рвов увеличивается за счет углубления впадин. Вследствие слияния заполнения глинисто-обломочным материалом карстовых полостей и трещин под дном рва бортовой поток смещается в сторону склона, где возникают новые провалы. Третья стадия – затухание карста в пределах, рва и проявление эрозии. На дне рва отлагается илистый материал, происходит заболачивание, появляются карстовые озера. В результате выравнивания дна создаются условия для поверхностного стока к одному из концов рва или к пониженным его частям.

По трещинам бортового отпора может происходить обрушение пород на склонах. Наличие трещин, карстовых рвов и связанных с ними небольших пещер понижает устойчивость склонов и присклоновых участков междуречий, что неблагоприятно для дорожного, гидротехнического и других видов строительства.

Карстовые мостовые

Они представляют собой обнаженные гладкие поверхности известняков, расчлененные вертикальными трещинами. Описаны карстовые мостовые в Ирландии, Англии, Онтарио

(Канада), а также в Альпах. Г. А. Брук [48] и другие исследователи относят их к гляциокарстовым образованиям. В Наханни (Канада) они возвышенностях. распространены на сложенных массивными известняками среднего девона, в субарктических условиях при среднегодовой температуре воздуха – 4°C, среднегодовом количестве осадков 566 мм и наличии островной мерзлоты. Форма мостовых определяется топографией, условиями залегания пород и характером трещиноватости известняков. В формировании мостовых Наханни важную роль играла ледниковая экзарация, в результате которой удалялись обломки пород и происходило выпахивание известняка. На поверхности их встречены сильно выветрелые ледниковые валуны. Предполагают, что возраст мостовых довюрмский. исследование мостовых на известняках карбона было проведено в Камбрии (Англия). По характеру расчленения выделено 3 типа мостовых [54]. Аналогичные формы В гипсах отмечены Беломоро-Кулойском плато. Это блоки гипса четырёхугольной формы с поперечником 1–5 м, разграниченные трещинными углублениями.

Карстовые депрессии

Карстовые депрессии с поперечником от 1–3 до 10 км отличаются от котловин тем, что в их формировании большую роль играет эрозионные процессы и по генезису они чаще всего являются эрозионно-карстовыми. Карстовые депрессии характерны для гипсово-ангидритового карста. Наиболее благоприятны для их развития контакты сульфатных пород с карбонатными или терригенными. Описаны приконтактные депрессии на крыльях Уфимского вала в Пермской области. Депрессии формируются также в сводах локальных положительных структур, где на поверхность выходят гипсы [8]. В зависимости от соотношения карстовых и эрозионных процессов, а также гидрологических особенностей выделяют четыре типа депрессий (табл. 8).

Карстовые депрессии – замкнутые, с преимущественно подземным стоком. Поверхностные воды, стекающие в депрессии, поглощаются понорами на дне воронок или питают озера. Наиболее глубокие из них вскрывают карстовые воды. На склонах и дне депрессий происходят провалы. Сухие депрессии с понорами на дне встречаются на западном склоне Уфимского вала. Озерными депрессиями являются Дреминская, Дикоозерская в Кишертско-Суксунском карстовом районе. Например, Дикоозерская депрессия имеет длину около 4 км, ширину до 1,8 км, глубину 90 м. В ней расположено

Таблица 8 Типы депрессий в районах сульфатного карста Пермской области (по К. А. Горбуновой и К. Г. Бутыриной)

		bon n K. I . Dy II			
Тип попросоції	ип депрессий Степень обводненности Сток из депрессий			Принор	
тип депрессии	Степень ооводненности	поверхностный	подземный	Пример	
Карстовые	сухие с понорами	отсутствует	преобладает	депрессии западного крыла Уфимского вала	
	1	отсутствует или сезонный	преобладает	Дреминская, Дикоозерская	
	с подземно-проточными озерами	отсутствует	преобладает	Мазуевская	
Эрозионно- карстовые	с восходящими источниками	в виде небольших рек	незначительный	Низковская, Суксунско- Советинская	
	вскрытые рекой с подземнопроточными озерами	речной	незначительный	в долинах рек Полазны и Кухтыма	
	вскрытые рекой озерные	речной	незначительный	Озерная	
	сложные со сточными родниковыми озерами	речной	незначительный	Дурнятская	
Карстово- эрозионные	вскрытые речной долиной	речной	отсутствует	Мутнинская	
Карстовые, частично или полностью погребенные	сухие	отсутствует	отсутствует	Полазненская	

восемь озер с пресной водой. В одном из них в 1953 г. произошел провал.

Депрессией с подземно-проточными озерами является Мазуевская ($3\times1,5$ км) глубиной до 100 м. В ее пределах расположено несколько озер: Большое (160×57 м) глубиной около 6 м, Черная Яма (62×41 м), Карасье (400×70 м) глубиной более 8 м, Южное (240×140 м) и другие с минерализацией воды от 180 мг/л до 1,5 г/л (сульфатно-кальциевый состав). В депрессии известно три пещеры, входы в которые расположены у подножья гипсовых скал в карстовых котловинах.

Эрозионно-карстовые депрессии имеют поверхностный сток или являются проточными. К сточным депрессиям, на дне которых вытекают восходящие источники, относятся Низковская и Суксунско-Советинская. В долине р. Полазны образовалась проточная депрессия с заболоченным дном длиной 1,3 км и шириной до 450 м. Северная часть ее занята озером (198×115 м) глубиной до 10 м, которое состоит из трех воронок. Озеро питается сульфатными водами с минерализацией 1,9 г/л.

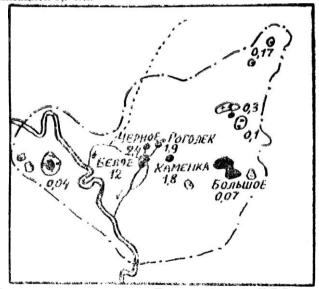


Рис. 18. Дурнятская карстовая депрессия в Пермской области (по К. Г. Бутыриной)

К сложным проточным депрессиям относится Дурнятская в долине р. Пожвы с площадью около 2 км^2 (рис. 18). По данным К. Г. Бутыриной, в ней расположено 11 карстовых

озер с поперечником от 52 до 232 м. Три озера имеют глубину от 30 до 61 м. Глубокие сточные озера центральной части депрессии: Белое, Черное, Роголек и Каменка – питаются преимущественно подземными минерализацию 1.8-2.4 г/л Три озера имеют сульфатно-кальциевый Проточное оз. Белое только состав. поверхностном отличается минерализацией слое сульфатно-кальциевым составом, в остальной части до глубины 46 м достигает 12 г/л, преобразуется минерализация a состав хлоридно-натриевый, что указывает на образование депрессии в результате не только сульфатного, но и соляного карста. Озера западной и восточной частей депрессии относятся к бессточным. Минерализация их воды составляет 41-334 мг/л; они атмосферными преимущественно осадками. Разгрузка Дурнятской депрессии происходит в виде двух ручьев, вытекающих из оз. Белого, с суммарным расходом около 500 л/с.

Карстово-эрозионные депрессии пересекаются речными долинами, например, Мутнинская депрессия — р. Мутной, в долине которой выходят карстовые источники. В ряде карстовых районов Пермской области вскрыты скважинами карстовые депрессии, заполненные брекчией коренных пород и четвертичными отложениями. Они имеют вид плоских замкнутых понижений неправильных очертаний.

Соотношение карстовых и эрозионных процессов изменяется по мере эволюции карстового рельефа. Одна из схем развития депрессий: воронки – котловины – бессточные озерные депрессии – депрессии с подземнопроточными озерами – родниковые депрессии – вскрытые эрозией депрессии. В зависимости ОТ геолого-гидрогеологических и геоморфологических условий отдельные стадии в этой схеме могут выпадать. В некоторых случаях в депрессиях, которых ограничивается в глубину наличием карстующихся или некарстующихся пород, на определенной стадии развития начинают преобладать аккумулятивные процессы. Пологие депрессии с большой мощностью рыхлых отложений встречаются в районах соляного карста.

Полья

Наиболее крупными отрицательными формами рельефа карстовых областей являются полья. Известный советский геоморфолог И. С. Щукин дает следующее определение этих форм: «Под южнославянским названием полья как в народном языке, так и в научной литературе подразумеваются обширные, поверхностно бессточные (замкнутые) котловины,

встречающиеся в карстовых странах Балканского полуострова, на Ионических островах, во Французской Юре, на о. Ямайка и в некоторых других областях» [44]. Г. А. Максимович [26] понимает под польями «обширные продолговатые замкнутые впадины карстовых областей, обладающие ровным дном и крутыми, щногда совершенно отвесными стенками». По Н. А. Гвоздецкому [5], «полья – обширные, иногда громадные котловины (в Югославии Ливаньско полье 379 км², Попово полье 181 км²), плоскодонные и довольно крутосклонные, имеющие характерные гидрографические особенности – реки и ручьи, исчезающие в понорах на дне».

В «Словенской карстовой терминологии» [67] есть такое определение полья: «огромная карстовая депрессия с плоским дном и выходом карстовых вод; в типичном случае имеется исчезающая река и крутые склоны». Известный французский исследователь карста Б. Жез обращает внимание на гидрологическую характеристику полья: «обширная замкнутая карстовая депрессия с ровным дном и резким переходом его в склоны, которые чаще всего являются крутыми, с выходами карстовых вод; могут быть сухими, сезонно затопляемыми или пересекаться реками».

В определении Д. Гавриловича отражен генезис донных осадков польев: «огромные депрессии в карстовых областях, замкнутые или открытые с одной стороны, с плоским дном, покрытым аллювиально-озерными осадками, имеющим крутое скалистое обрамление; они достигают в ширину нескольких километров, длину — десятков километров; по периферии имеют крупные источники и поноры, по дну протекают карстовые реки».

Как видим, особенностями польев являются большие размеры, плоское дно, крутые склоны, резко переходящие в дно, выход карстовых вод, исчезновение рек, наводнения, избирательная эрозия, приуроченность к определенным тектоническим структурам. По И. Гамсу, полья Динарского карста имеют 3 наиболее типичных признака [52] 1) плоское дно шириной более 400 м, покрытое аллювием; 2) замкнутость, крутые склоны, по крайней мере с одной стороны; 3) выход карстовых вод. Средняя высота польев 581 м, средняя площадь дна 61 км², количество сторон с крутыми склонами 2,55 (табл. 9).

На территории СССР полья встречаются на южном известняковом склоне Большого Кавказа (Грузия). Шаорское полье расположено на северном склоне Рачинского хребта на абс. высоте 1130 м. Его площадь достигает 130 км². До сооружения Шаорской ГЭС на плоском дне полья были отмечены как восходящие источники, так и исчезающие реки.

Во время продолжительных дождей полье затоплялось водой [38].

Ахалсопельское полье площадью 30 км² расположено на некарстующихся породах. Дно покрыто аллювиальными и озерно-аллювиальными отложениями мощностью до 80 м» По дну полья до создания водохранилища протекала р. Ткибула, исчезавшая в карстовом колодце. Таково же Цебельдинское полье, находящееся к востоку от Сухуми, и небольшое синклинальное полье Турчу.

Таблица 9 Морфологические признаки польев Линарского карста (по И. Гамсу)

Wiopφosioth teekhe nphshakh hosibeb Annapekoto kapeta (no 11: 1 amey)					
Полье	Ср. абс. высота, м	Площадь дна, км ²	Количество сторон с		
TIONIBC	ср. аос. высота, м		крутыми склонами		
Планинско	450	9	4		
Церкнишко	550	45	3		
Постоинско	550	65	1		
Лика (Личко)	550	474	1		
Гачко	450	86	1		
Ливанийско	700	385	4		
Купрешко Дуго	1185	11	2		
Попово	255	185	3		
Дабарско	470	30	4		
Невесиньско	850	188	3		
Фатничко	460	27	3		
Гатачко	940	61	3		

Морфология, гидрография, происхождение и типизация польев рассмотрены И. Цвийичем [51]. Под термином полье он понимал «большие впадины карстового происхождения с плоским дном, вытянутые в одном направлении, дно полья может быть наклонено от одного края к другому, но чаще всего оно делится на многочисленные гидрографические бассейны». Иногда группа польев имеет общий наклон, соответствующий стоку поверхностных и подземных вод. На дне полья, сложенного аллювиальными, озерными, на некоторых участках — коренными породами, местами возвышаются «хумы» или останиы.

И. Цвийич, исходя из гидрологического режима, выделяет

сухие, периодически затопляемые водой и затопленные водой, или озерные, полья. Источники выходят обычно из трещин или пещер в основании склона. Поверхностный сток поглощается как зияющими понорами и трещинами в обнажениях породы, так и заполненными аллювием русловыми понорами. Встречаются также эставеллы, функционирующие то как поглощающие поноры, то как источники.

обстоятельно классификация польев разработана И. Гамсом. Он типизирует полья по ряду признаков. По структурным **V**СЛОВИЯМ различает полья грабеновые. антиклинальные. синклинальные, горстовые. По гидрологическим признакам И. Гамс выделяет полья а) с поверхностным водотоком, который начинается на площади развития водонепроницаемых пород и исчезает на дне полья; б) с водотоком, появляющимся у одного склона и исчезающим у противоположного (проточные); в) периодически затопляемые; д) криптодепрессионные озерные; дном, соответствующим пьезометрическому уровню карстовых вод.

Полья подразделяются также по форме (чашеобразные, котлообразные, долинообразные и др.), положению в рельефе (горные, предгорные), климату, возрасту и составу отложений на дне и др.

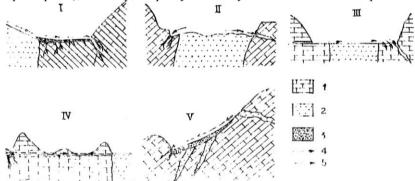


Рис. 19. Типы польев (по И. Гамсу): I — пограничное приточно-понорное, II — периферийное с центробежным поверхностным стоком, III — котловинообразное проточное, IV — с дном, соответствующим пьезометрическому уровню карстовых вод, V — предгорное; I — известняк, 2 — флиш или доломит, 3 — аллювий, 4 — постоянный сток, 5 — периодический сток

Большую роль в формировании польев играет тектоника, наличие крупных разрывных нарушений, по которым контактируют породы различного литологического состава. Взаимоотношение карстующихся и менее карстующихся или некарстующихся пород в пределах полья определяет условия выхода карстовых вод и поглощения рек. Этот признак И. Гамс положил в основу морфолого-гидрологической классификации польев (рис. 19). Было выделено пять типов их.

- І. Пограничные. Формируются на границе карстующихся и водоупорных пород. Поверхностные водотоки, берущие начало на некарстующихся породах, поглощаются на дне полья.
- II. Периферийные. Водонепроницаемые отложения слагают центральную часть полья. Поверхностный сток направлен от центра к периферическим частям полья, сложенным известняками.
- III. Проточные полья. Дно их целиком или частично сложено полупроницаемыми (доломитами) или некарстующимися породами, служащими барражем для подземных вод, которые выходят у одного склона, текут по дну полья и исчезают у противоположного склона.

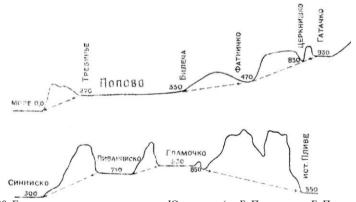


Рис. 20. Гидрогеологическая связь польев Югославии (по Б. Петровичу и Б. Прелевичу)

IV. Полья с дном, соответствующим пьезометрическому уровню подземных вод, связанных с рекой или морем. В результате движений земной коры некоторые из них преобразовались в криптодепрессионные озера (оз. Скадарско, оз. Врана на о. Крее).

V. Предгорные, Располагаются у подошвы склона горы, часто в местах выхода на поверхность пластов некарстующихся пород.

В Динарском карсте (Югославия) полья отмечены на разных высотных уровнях (рис. 20). Они образуют единую гидрографическую систему с общим стоком, поверхностным и подземным, в Адриатическое море (рис. 21). Полья Гатачко, Фатничко, Дабарско и Попово до осуществления гидроэнергомелиоративных мероприятий заливались водой в течение длительного времени. В полье Фатничко эставелла Обод зимой имела расход до 60 м³/с, в сухой же период она функционировала как поглощающий понор. Расход р. Требишницы

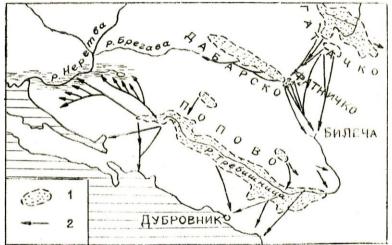


Рис. 21. Пути стока карстовых вод из польев в Югославии (по Б. Прелевичу): 1 – контуры польев, 2 – направление подземного стока

у Билеча составлял в среднем $41 \, \mathrm{m}^3/\mathrm{c}$ при максимальном свыше $200 \, \mathrm{m}^3/\mathrm{c}$, а в Попово полье у г. Требине — соответственно около $100 \, \mathrm{u}$ $700 \, \mathrm{m}^3/\mathrm{c}$. В полье река поглощалась понорами и пещерами. Подземный сток из польев направлен в р. Неретву и Адриатическое море, где по сбросу на контакте эоценового флиша и нижнеюрских известняков вытекает р. Омба (Дубровник) с расходом от 4 до $140 \, \mathrm{m}^3/\mathrm{c}$. На дне моря карстовые воды питают субмаринные источники «врули».

Происхождение польев. В зависимости от генезиса И. С. Щукин [44] выделял четыре типа польев: 1) тектонические, т. е. грабены и синклинали, осложненные карстом,

и полутектонические, образующиеся путем перегораживания речной долины поднимающейся глыбой или складкой; 2) возникшие посредством механического выноса нерастворимой породы, залегающей среди проницаемых известняков; 3) образовавшиеся в результате слияния группы воронок; 4) провальные, возникшие путем обрушения свода подземной реки.

Многие авторы, занимавшиеся проблемой происхождения кольев, отмечают их приуроченность к некарстующимся и слабокарстующимся породам, залегающим среди карстующихся. Г. Луи, исследовав полья западной части Центрального Тавра в Южной Анатолии (Турция), пришел к выводу, что они являются частями синклиналей или моноклиналей, в которых развивались до начала карстообразования древние речные долины. Оформление замкнутых польев с аллювиальными отложениями на дне является более поздним процессом, карстообразованием и поглошением связанным c поверхностных водотоков, т. е. подземным дренажом. Образование польев автор связывает с наличием в толще карбонатных пород водонепроницаемых, обычно флишевых, отложений.

Ж. Мартен описывает 6 польев в центральной части плато Эль-Хаммам (Средний Атлас), расположенных на высоте 1560–1650 м. Они имеют удлиненную форму (2,5–5 км), крутые склоны и плоское дно. Плато испытало влияние нескольких фаз тектонических движений, которым соответствуют стадии развития рельефа. На стадии врезания флювиально-карстового типа образовались незамкнутые понижения, на второй – полья, днища которых подверглись карстовой планации.

На плато Мехединци (юго-запад Румынии) 80 % польев подстилается некарстующимися породами (сланцами, мергелями, гнейсами и т. д.) и лишь 20 % — известняками [57]. Для польев этого плато характерны следующие черты: 1) большие размеры, медленное расширение в результате регрессивной аккумуляции; 2) сильное меандрирование рек в пределах польев, присутствие озер и болот; 3) исчезновение рек или постепенное уменьшение объема их стока; 4) переливание в половодье вод некоторых рек в соседние бассейны; 5) наличие систем подземного стока и связанных с ними подземных карстовых форм; 6) обрушение сводов некоторых пещер и другие явления, отражающиеся в морфологии польев; 7) отступание склонов польев вверх по течению рек и формирование уступов.

Д. Космовска-Савчинска [59] в результате изучения польев Югославии (Дабарско, Фатничко, Планинско) предложила

новую концепцию их образования. Полья расположены на дне обширной депрессии, вытянутой с юго-востока на северо-запад более чем на 80 км (абс. высота 600 м), сложенной верхнеэоценовым флишем. Возвышенности между польями образованы известняками. Автор считает основной причиной возникновения и эволюции польев разрушение и удаление флиша в результате избирательной эрозии. По мере врезания рек и развития карста водотоки с площадей, сложенных флишем, поглощаются карстовыми полостями, что вызывает обособление польев. Наличие известняковых возвышенностей между польями указывает на меньшую интенсивность карстовых процессов по сравнению с денудацией флиша.

Р. Ленаф, исследуя полья гор Кордильера-Бетика (Испания), установил, что они образуются в периоды тектонической стабильности, их заложению благоприятствуют надвиги и сбросы. Роль тектоники и гидрогеологических условий в эволюции польев, особенно их окраин, гор Атласа, Андалузии, Южной Франции, Греции, Югославии и Ливана показал Ж. Нико.

Таким образом, полья характерны для складчатых областей, где в дислоцированных толшах известняков некарстующиеся или слабо карстующиеся породы. Они появляются на определенном этапе формирования рельефа карстовых областей. На начальном этапе на площадях, сложенных некарстующимися породами, закладывается эрозионная сеть. По мере размыва этих отложений и активного карстообразования водотоки на отдельных участках начинают поглощаться карстовыми понорами и пещерами, происходит фрагменты, эрозионной расчленение сети на отдельные поверхностный сток переходит в подземный. Продукты эрозии выносятся из возникающих замкнутых понижений подземным путем. Обрушение сводов родниковых и поглощающих реки пещер и других полостей сопровождается отступлением склонов и расширением аккумулятивного дна полья. Не исключается возможность образования небольших польев и провальным путем.

Полья играют большую роль в экономике стран. В карстовых областях к ним приурочены населенные пункты. Карстовые источники и реки, а также созданные на них водохранилища, используются для водоснабжения населения и в энергетических целях. Днища польев покрыты плодородными почвами. Сооружение плотин и водохранилищ на карстовых реках, позволяющее регулировать поверхностный сток, создает условия для осущения заливаемых водой польев

и превращения их в плодородные сельскохозяйственные угодья. Большой интерес для геологов представляют погребенные и древние ископаемые полья, с которыми могут быть связаны различные месторождения полезных ископаемых. Такие полья отражают этапы длительных континентальных перерывов в осадконакоплении. Они создают сложные фациальные неоднородности в мощных карбонатных толшах.

Карстовые останцы

В Геологическом словаре (1978, т. 2) дано следующее определение термина «останец»: изолированная возвышенность, уцелевшая от разрушения более высокой поверхности процессами денудации. Карстовые останцы — это выступы, холмы, горы, сложенные известняками, гипсами, солями, реже — другими

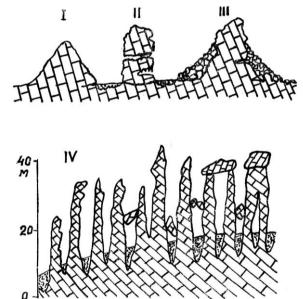


Рис. 22. Форма тропических карстовых останцов (по Д. Балажу): I – конус, II – башня, III – конус, покрытый, осыпью, IV – «каменный лес»

карстующимися породами, в формировании которых значительную роль играют карстовые процессы. Наибольшие размеры имеют они (холмы, горы) в карбонатных породах, меньшие (столбы, столы, грибы) – в сульфатных и соляных (рис. 22).

Площади развития останцов, их групп или гряд, разделенных котловинами, польями или равнинами, создают останцовый, рельеф карстовых областей. Останцовый карст типично представлен в дислоцированных карбонатных толщах тропических областей. Реликтовые останцы встречаются вне тропиков. Древний И погребенный останцовый рельеф обнаружен разработке при месторождений полезных ископаемых.

Останцовый рельеф тропической зоны. В жарком тропическом поясе земного шара находятся карстовые области Америки, Африки и Азии. Площадь их известняковых массивов составляет 7250 тыс. κ км² (табл. 10). Территория

Таблица 10 Площади известняковых массивов тропической зоны по Ж. Корбелю [50], тыс. κm^2

I/ avenue	Известняковые	Массивы с осадками, мм		
Континент	массивы	более 1500	более 2500	
Африка	200	100	50	
Америка	3800	1600	250	
Азия	3250	2000	350	
Итого	7250	3700	650	

с влажным (более 1500 мм осадков в год) и очень влажным (более 2500 мм) климатом достигает 4350 тыс. км². Наиболее изучен тропический останцовый карст Больших Антильских островов (Кубы, Ямайки, Пуэрто-Рико), Китая, Вьетнама, Индонезии.

На о. Ямайка 2/3 территории занимает плато с абс. отметками 305-914 м, сложенное преимущественно известняками олигоцена и эоцена. Известняки осложнены сбросами. Г. Леманн различает здесь два основных типа карста: кокпит и турмкарст (башенный). Термин «кокпит» ямайского происхождения, используется для обозначения замкнутой котловины с крутыми бортами, расположенной между коническими холмами (синонимами термина кокпиткарст являются кегелькарст, конический карст). Карст кокпит распространен на севере и в центральной части острова, между городами Стеварт и Марун. Площадь, занятая им, имеет ширину 48 км, длину 80 км. Кокпит представляет собой однообразное чередование конусовидных возвышенностей высотой

до 120 м и диаметром основания до 400 м с котловинами («кокпитами») и замкнутыми долинами. Поверхность известняков осложнена острыми каррами высотой от 0,6 до 4,6 м. Башенный карст (турмкарст) представлен изолированными башнеобразными возвышенностями известняка высотой до 180 м с крутыми склонами (60–90°), разделенными плоскими аллювиальными долинами (равнинами). Они аналогичны моготе Кубы. Этот тип карста распространен в зоне разломов на севере и на внутренних участках долин центральной части острова. Встречается кегельный и башенный карст, характеризующийся выположенными склонами (20–30°) и более плавным переходом их в котловины и равнины.

На о. Пуэрто-Рико карстуются известняки олигоцена и миоцена, мощность которых достигает 1700 м. Ф. Д. Миотке [62] описывает останцовый карст моготе в северной части Пуэрто-Рико восточнее Аресибо. Олигоцен-миоценовые известняки выходят на поверхность полосой вдоль северного побережья, ширина которой 22 км, длина 125 км. Эрозия и карстообразование начались с середины миоцена в результате поднятия данной территории. Характер рельефа изменяется северного побережья к внутренним гористым соответственно выходу известняков различного возраста и состава. Над прибрежной частично заболоченной равниной и морскими террасами возвышаются останцы миоценовых известняков высотой 30-70 м. Внутри этой области развиты карстовые равнины, покрытые песчаными отложениями. Останцы в олигоценовых известняках отличаются более крутыми склонами и большей высотой. Впадины между ними слагаются глинистыми песками.

Количество осадков в карстовых областях Пуэрто-Рико достигает 1700 мм в год, они выпадают в виде ливней. После 20-минутного ливня сразу же появляется яркое солнце. В результате интенсивного испарения карбонаты кальция отлагаются на поверхности известняков в виде кальцитовой коры. Процессы растворения и вторичного отложения известняка быстро сменяют друг друга. Поверхность останцов покрыта лесом. Часть выпавших атмосферных осадков Задерживаясь на просачивается глубь известняков. проницаемых отложениях, вода питает родники (рис. 23). Вода, стекающая по поверхности останцов, поглощается у их подножья. В местах поглощения поверхностного стока происходит оседание и обрушение поверхности. На карстовых равнинах, занятых плантациями тростника и ананасов, водные потоки направлены к их окраинам и исчезают в понорах у подножья останцов. Песок и глина, переносимые

потоками, часто закупоривают поглощающие отверстия, и тогда образуются озера и болота.

Водоносный горизонт в известняках залегает на глубине около 150 м ниже поверхности равнин и на несколько см

НИЗКОРОСЛЫЙ ЛЕС

ПОНОР

САХАРНЫЙ
ТРОСТНИК

АНАНАСЫ

МОГОТЕ

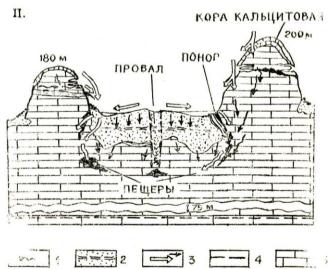


Рис. 23. Поперечное сечение моготе и разделяющих их равнин (по Ф. Д. Миотке): I – распределение растительности; II – условия поглощения атмосферных осадков и поверхностного стока: I – родник, 2 – песчано-глинистые отложения, 3 – направление поверхностного и подземного стока, 4 – уровень карстовых вод, 5 – известняк

выше уровня моря. Гидрохимические исследования показали, что воды, поглощаемые у подножья останцов, не насыщены карбонатом кальция. Известняк растворяется не только с поверхности, но и в пещерах, расположенных на границе останцов с равнинами. В пределах равнин нередко встречаются воронки, карстовые озера и болота. Ф. Д. Миотке описывает провал над пещерой, возникший восточнее Мирафлореса в 1969 г.

Нуньес Хименес выделяет несколько морфологических видов карста на Кубе: останцовый (моготе), карст холмов, гор и месет, проявляющийся в геосинклинальной обстановке и др. Останцовый карст наиболее широко распространен в верхнеюрских известняках западной части острова — Сьерра-де-лос-Органос. Это параллельные цепи известняковых останцов, разделенных польями и долинами. Моготе имеют почти отвесные склоны высотой до десятков, а иногда и сотен метров. Вершины их конические, реже — округлые. По тектоническим трещинам в известняках развиваются ущелья и пещеры.

В Южном Китае останцовый карст сформировался в условиях теплого и влажного климата в известняках палеозоя и триаса [23, 69]. Он представлен коническими, башенными, переходными формами, «каменными лесами» (шилин) — группами столбов, зубьев, пиков, пирамид высотой до 100 м. Описаны каменные леса на Юньнаньском нагорье. В северо-восточной части Гуанси известняки занимают тысячи квадратных километров и имеют мощность от 50 до более 600 м. Известняки смяты в складки и осложнены разрывными нарушениями, по которым контактируют разновозрастные свиты. Высота останцов колеблется в больших пределах — от нескольких до 200 м и более. Останцовый рельеф в различных стадиях развития приурочен к определенным частям структур; например, к центральным частям антиклиналей — группы высоких останцов, разделенных замкнутыми котловинами, напоминающими полья, к периферическим — одиночные останцы среди равнин.

В Северном Вьетнаме останцовый карст развит на площади около 50 тыс. км² преимущественно в каменноугольных и пермских известняках мощностью более 1200 м, дислоцированных и раздробленных [15]. В районе Шон-Ла разрушенные останцы поднимаются среди мощной толщи элювиальных красных глин. На плато Мок-Тяу (абс. отметки до 1000 м) основными формами являются котловины и останцы известняков высотой 20–50 м. Область карстовых останцов полукольцом охватывает дельту р. Красной. По данным

И. Шилара, в бухте Халонг останцы затоплены морем на 20–30 м. Карстовые останцы представляют собой изолированные массивы или гряды высотой от 30–50 до 200–300 м и площадью до нескольких квадратных километров. Обычно они имеют крутые почти отвесные склоны. Вершины и склоны осложнены причудливыми формами выветривания известняка. Некоторые останцы пронизаны густой сетью полостей и пещер, в центре других расположены замкнутые котловины. В настоящее время они интенсивно разрушаются. Останцовый карст широко распространен на островах Малайского архипелага (Суматра, Ява и др.).

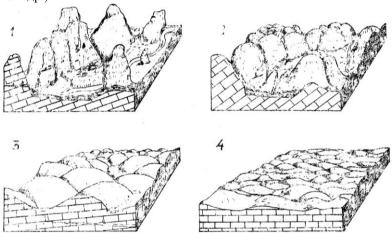


Рис. 24. Основные типы останцового тропического карста (по Д. Балажу): 1 – яншо, 2 – органос, 3 – севу, 4 – туал

Формы карстовых останцов и их группировка разнообразны, определяются тектоникой, литологией и стадией развития рельефа. Наряду с двумя основными морфологическими типами – коническим (кокпит, кегелькарст) и башенным (турмкарст) – существуют многочисленные промежуточные типы. Д. Балаж [47] считает, что каждый район тропического карста представляет собой результат индивидуального развития. Типы тропического карста он характеризует с помощью морфометрического индекса (ММ). Это частное от деления поперечника карстового останца на его высоту. Д. Балаж наметил четыре типа останцового карста (рис. 24).

Тип	MM	Высота останцов, м	Количество форм на км ²
Яншо	< 1,5	100–300	5–10
Органос	1,5–3,5	50–200	10–20
Севу	3–8	30–120	15–50
Туал	>8	10–50	0-50

Яншо — название по одноименному городу в провинции Гуанси (Китай), в районе которого развит останцовый рельеф; органос изучен в горах Сьерра-де-лос-Органос на Кубе; тип севу представлен на плато Севу в Индонезии, на юге острова Ява; туал — название по одноименному населенному пункту на острове из группы островов Кай, расположенных южнее Новой Гвинеи. Выделенные типы не соответствуют стадиям денудации. Генетическая корреляция между ними отсутствует. В некоторых случаях трудно отнести карст к одному из выделенных типов. В Северном Вьетнаме и Лаосе есть районы, где тип карста является переходным между типами яншо и органос. Возможны типы органос-сезу, севу-туал. Каждый основной тип карста имеет два подтипа: с плотным и изолированным расположением останцов.

Ряд исследователей отмечают некоторые общие особенности тропического останцового карста: 1) наличие большого количества останцов на сравнительно небольшом участке земной поверхности; 2) быстрый рост разделяющих их котловин в глубину до местного базиса эрозии; 3) чередование интенсивной поверхностной коррозии известняков с образованием карров и других карстовых форм и процесса отложения кальцита в виде сталактитов, занавесей над нишами и кальцитовых кор; 4) образование краевых равнин на уровне базиса карста; 5) формирование пещер или желобов в основании останцов. В типичных тропических останцах несмотря на лесную растительность покровные образования на известняках отсутствуют. Растения непосредственно контактируют с породой, т. е. корни их проникают в трещины, карры, отверстия.

Вопросы типизации и формирования останцового тропического карста в известняках освещены в многочисленных работах зарубежных (Г. Леманн, Ж. Корбель, Д. Балаж, И. Шилар, И. Глазек, Ф. Д. Миотке, др.) и советских исследователей (В. Г. Лебедев, С. В. Егоров, М. А. Зубащенко, И. Ф. Геллерт, Н. А. Гвоздецкий, Г. А. Максимович). Некоторые из них считают, что основную роль в формировании различных типов останцового карста геологические условия: неотектоника, структура, трещиноватость, литология.

В. Панош и О. Штелцл классифицируют изолированные известняковые возвышенности Кубы по структурно-генетическому признаку. М. Д. Дей установил связь между типами карстового рельефа и такими свойствами известняков, как степень чистоты и твердости, для 13 районов тропического карста Карибского региона и Центральной Америки. Б. Жез и А. Манжен [53], изучив моготы юго-восточнее Гаваны и в Сьерра-де-лос-Органос, имеющие диаметр основания от 100 до 500 м и высоту от 50 до 200 м, пришли к выводу, что их эволюция определяется в основном тектоникой и литологией известняков. Климатический же фактор имеет подчиненное значение.

Другие исследователи обращают внимание на связь между морфологией и стадией развития останцового рельефа. Л. Якуч [45] намечает четыре фазы денудации карстовой поверхности в тропиках, причем третья соответствует возникновению конического карста, а четвертая – башенного. Г. Леманн [60] выделил следующие стадии тропического известнякового эволюции карста: доостанцовую, холмисто-останцовую, останцовую и изолированных Г. А. Максимович [26] различает четыре типа останцового карста, отражающих развития: 1) холмисто-останцовый, стадии его 2) останцовый, 3) останцы известняковых краевых равнин, покрытых рыхлыми отложениями; 4) останцовый погребенный.

Обзор зарубежной и советской литературы позволил сделать вывод, что останцовый карст характерен для дислоцированных мощных карбонатных толщ тропических областей. Морфология останцов в начальный этап развития в значительной степени определяется структурно-литологическими условиями (приуроченностью соответствующим частям структур, степенью раздробленности и трещиноватости известняков, их химическим составом). Эволюция карста контролируется неотектоническим останцового режимом территорий. восходящего Этапам тектонического развития соответствуют различные морфологические разновидности холмистоостанцового и останцового карста (преобладают положительные формы), в условиях более спокойного тектонического режима формируются аккумулятивные равнины с поднимающимися среди них останцами и при нисходящем развитии – погребенный или затопленный морем останцовый рельеф.

Наряду с типичным останцовым рельефом встречаются останцы известняков среди некарстующихся толщ. Примером является башенный карст Чиллага на северо-востоке Австралии, полоса которого вытянута на 60 км при ширине

8 км. Это удлиненные (до 1 км) башнеобразные останцы силуродевонских известняков высотой до 100 м, поднимающиеся среди вулканических пород (Т. Д. Форд). Вершины их осложнены каррами. Аналогичные формы отмечены на Кубе и в других карстовых областях.

Карстовые останцы тропических вне областей. Вне тропических областей встречаются современные, образовавшиеся в условиях умеренного или даже полярного климата, и в основном реликтовые останцовые формы. Г. А. Брук и Д. Форд [48, описывают башенный карст в области субарктического континентального климата Наханни (горы Макензи в Канаде). Карстовый рельеф представлен лабиринтом, состоящим из проходов глубиной до 185 м и длиной до 9 км, польев глубиной 125 м при длине 2-3 км и башен высотой до 125 м. Они развивались в холодном климате в массивных карбонатных породах, отличающихся незначительной проницаемостью, пористостью осложненных нарушениями. В большинстве случаев карстовые останцовые формы умеренных областей сформировались в более ранние теплые эпохи. П. Хабич [55] исследовал куполообразные холмы 8 карстовых районов Словении (Югославия) на высотах от 900 до 1500 м над уровнем моря. Эти формы возникли в толстослоистых мезозойских известняках с прослоями доломитов. Наиболее благоприятным для их формирования был более теплый климат в плиоцене.

Н. А. Гвоздецкий [5] отмечает, что на территории СССР останцовый карст встречается только в виде реликтовых форм. К таким формам он относит известняковые останцы в районе оз. Эрцо в западной Грузии, а также останцовые формы Алайского хребта, Восточного Памира и Алтая. Е. Покорный описывает останцы, сформировавшиеся в условиях влажного и теплого климата палеогена на юге Краковско-Ченстоховской возвышенности в Польше. Останцы сложены известняками девона, карбона, триаса и юры. Они поднимаются над разделяющими их понижениями на высоту около 30 м. Склоны их крутые, в основаниях местами встречаются пещеры. Понижения между останцами плоские, покрытые глинами и лессом. В возникновении этих форм наряду с благоприятными климатическими условиями важную роль играли литологические различия известняков.

Останцы гипсо-ангидритовых пород. В гипсах и ангидритах в силу их относительно высокой растворимости древние останцы как правило не сохраняются. Выступы гипса или, реже, ангидрита высотой обычно не более 15 м могут возникнуть в областях с умеренно-влажным или сухим климатом [8]. В формировании их наряду с карстом принимают участие выветривание,

эрозия, гравитационные и другие процессы, соотношение которых меняется по мере развития карстового рельефа. В зависимости от соотношения основных процессов останцы подразделяются на несколько типов: карстовые (между слившимися воронками и котловинами), эрозионно-карстовые (в поймах рек и логах), гравитационно-карстовые (на склонах долин и водохранилищ), псевдокарстовые гравитационные (обрушившиеся закарстованные глыбы гипса), подземные (погребенные под некарстующимися породами). Условия формирования погребенных останцов в карбонатно-сульфатных толщах рассмотрены А. И. Печеркиным и Г. Б. Болотовым на примере карстовых районов востока Русской равнины.

Природные каменные столы и грибы. Встречаются в областях карбонатного, сульфатно-соляного и соляного карста. Они представлены тремя разновидностями: 1) карбонатными, бронированными некарстующимися породами; 2) карбонатными;3) соляными, бронированными менее растворимыми гипсами и нерастворимыми породами.

Погребенные палеокарстовые останцы. Карстовые останцы, сформировавшиеся в палеозое, мезозое или начале кайнозоя, были погребены под более молодыми отложениями. По данным М. И. Гевирц, при разработке полезных ископаемых на восточном склоне Среднего Урала были вскрыты останцы палеозойских известняков высотой до нескольких десятков метров, возникшие в мезозое в условиях тропического климата. Погребенные котловины, полья и останцы в известняках обнаружены при разработке месторождений боксита карстового типа. Г. А. Максимович и В. Н. Быков [27] считают, что при определенных условиях погребенные палеокарстовые останцы являются прекрасными коллекторами нефти и газа. Подобные залежи имеются во многих нефтяных районах, в частности в Волго-Уральской нефтяной провинции.

Таким образом, современные, реликтовые, полузатопленные морем, полупогребенные и древние погребенные останцы отражают этапы развития территории. Морфология, морфометрия, плотность останцов указывают на геологические условия (мощность пород, их состав, степень дислоцированности, тектонический режим) и климатическую обстановку (количество атмосферных осадков, характер их выпадения, температурные условия) времени их формирования. В типичном виде останцовый рельеф выражен в областях карбонатного тропического карста, но отдельные останцы или их группы встречаются в карбонатных, сульфатных породах и солях вне тропиков.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ ЗАКАРСТОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Инженерно-геологическая характеристика закарстованных территорий включает сведения о распределении карстовых форм, их литолого-стратиграфическим приуроченности определенным горизонтам и структурам, положении относительно современных и древних базисов эрозии [35]. С помощью комплексных исследований освещаются геологические и гидрогеологические условия развития участков отдельных составляется карста И инженерно-геологического районирования, которая является основой для выработки рекомендаций по размещению объектов строительства и мероприятий по борьбе с карстом (территория городов Дзержинска, Бирска, Альметьевска, Кунгура и др.). Ф. Рейтер приводит примеры оценки степени закарстованности и опасности возникновения провалов в районах Магдебурга, Фрейберга и Галле (ГДР).

нашей стране В 1967 г. изланы «Рекоменлании инженерно-геологическим изысканиям и оценке территорий для промышленного и гражданского строительства в карстовых районах» и «Рекомендации по проектированию зданий и сооружений в карстовых районах». На их основе в тресте ЗапУралТИСИЗ под руководством В. И. Мартина подготовлены методические указания по оценке степени закарстованпости территорий. На стадии выбора площадок для строительства изыскания начинаются с анализа обзорных карт, данным дешифрирования аэрофотоматериалов. составленных по Проекты детальной планировки промышленно-гражданских сооружений составляются на базе карты районирования территории по степени устойчивости, для построения которой 1) изучаются материалы региональных работ по карсту, дешифрируются аэрофотоматериалы и просматриваются крупномасштабные карты; 2) детально обследуются карстовые формы, состояние сооружений, опрашиваются местные жители; 3) проводятся комплексные геофизические исследования; 4) бурятся параметрические скважины, в которых осуществляются каротажные и опытно-фильтрационные работы; 5) используются результаты лабораторного моделирования провалов.

Таким образом, программа исследований предусматривает учет всех поверхностных и подземных форм, их морфометрическую характеристику. Определяются диаметр (длина, ширина), глубина воронок и котловин, собираются сведения

о провалах. Строятся графики распределения воронок и учтенных провалов в зависимости от их диаметра и глубины по И. А. Саваренскому [34]. Рассчитываются плотность воронок и коэффициенты закарстованности. Математическая обработка данных позволяет прогнозировать возможный размер провалов.

Еще в 1948 г. З. А. Макеев определил степень устойчивости закарстованных территорий по количеству провалов, образовавшихся в год на площади в 1 км². Он выделил 5 категорий закарстованных площадей. Г. А. Максимович характеризует 5 классов устойчивости с помощью показателей: N – количество провалов, возникающих в год на 1 км²; Т – число лет, в течение которых возникает 1 провал на 1 км². И. А. Саваренский на основе тех же показателей установил 6 степеней устойчивости.

Ряд исследователей отмечают активизацию провального процесса в определенные периоды. В районе г. Кунгура провалы возникают в годы с большим количеством осадков и высокими весенними паводками [24]. В. И. Мартин намечает для Башкирии 11–16-летнюю периодичность активизации провалов, соответствующую многолетней периодичности основных климатических факторов и режима карстовых Активизация провалов может быть вызвана техногенной деятельностью человека: изменением режима подземных вод при создании разработке водохранилищ, каналов, полезных ископаемых; нарушением структуры грунта и перераспределением стока при строительстве различных объектов; возрастанием нагрузок поверхность земли.

Согласно Н. С. Подорванову, в северо-западной части г. Славянска (Донецкая область), сложенной каменной солью, гипсо-ангидритами, известняками, отбор рассолов для солеварения через колодцы и скважины, а также использование грязи минеральных озер привело к активизации карста — образованию на поверхности мульд проседания, трещин отрыва, провалов. Все это сопровождалось разрушением зданий. Только управление карстовым процессом защитит территорию от деформаций, подтопления и засоления территории.

Н. М. Суховий описывает случай активизации карста в районе Николаевского карьера глин в Львовской области. Здесь карстующиеся гипсы и ангидриты перекрыты известняками (1–10 м), песчаниками, мергелями, глинами с прослоями песка, неогеновыми алевролитами, четвертичными песками и супесями. При откачке напорных вод из карьера активизировался естественный и проявился техногенный карст. Это сопровождалось образованием новых воронок:

в 1977 г. – 5, 1978 г. – 22, 1979 г. – 90, 1980 г. – 145 и в августе 1981 г. – 300. Увеличились ширина полосы, в которой развивались деформации, длина зияющих трещин и трещинных полостей.

Факторы активизации карста и провального процесса могут быть как естественными, так и искусственными. В. Н. Кожевникова [20] анализирует комплексные факторы. В. М. Кутепов выявил особенности напряженного состояния массивов водонасыщенных пород на участках развития карста в естественных условиях и при техногенном воздействии. Выявленные закономерности могут быть использованы при оценке устойчивости закарстованных участков.

образом, инженерно-геологической Таким при оценке территорий используются различные закарстованных методы: геологические, гидрохимические, геофизические, морфологические и морфометрические. Форма, размеры, генезис, частота возникновения форм характеризуют устойчивость территорий. отмечают В. И. Мартин, В. В. Толмачев и другие, основными задачами инженерно-геологических исследований, проводимых закарстованных территориях, являются разработка эффективных методов разведки, микрорайонирования детальной устойчивости закарстованных участков, прогноз влияния деятельности человека ца развитие карста и связанных с ним процессов и управление этими процессами. Карст как геодинамический процесс, определяющий инженерно-геологические условия возведения различных сооружений, трудах Ф. П. Саваренского, рассмотрен А. Г. Лыкошина, Г. С. Золотарева [14], И. А. Печеркина [30] и др.

КАРСТУЮЩИЕСЯ ПОРОДЫ И ЗАПОЛНИТЕЛИ КАРСТОВЫХ ФОРМ КАК ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ

Карстующиеся горные породы: известняки, доломиты, мрамор, гипс и ангидрит, писчий мел, каменная соль — являются полезными ископаемыми. Наличие в них полостей и карстовых форм в кровле (карры, поноры, воронки и котловины), заполненных песчано-глинистым материалом, снижает их качество. При разработке мрамора приходится исключать зоны глубоких карстовых воронок и колодцев, заполненных песками и глинами. Пещеры также создают зоны загрязненных пород.

Г. А. Максимович подразделяет полезные ископаемые карстового типа на автохтонные, образовавшиеся в результате переотложения продуктов растворения самих карстующихся

80

пород, и аллохтонные, инородные по отношению к последним. К автохтонным относятся оптический гипс, исландский шпат, оникс, сера, некоторые месторождения фосфоритов. Гипс известен в пещерах Средней Азии. В пещере Мамонтова (США) его добывали в глубокой древности. Мраморный оникс добывается из Карлюкской пещеры. По данным Р. А. Цыкина, оникс есть в 46 спелеообъектах Алтае-Саянской карстовой области. Только в обвальных отложениях 12 пещер, разработка которых не наносит ущерба пещерам, запасы его опениваются в 300 т.

Самородная сера карбонатно-сульфатных комплексов образуется в результате окисления сероводорода в присутствии углеводородов, воды и при участии бактерий. Закономерности размещения месторождений самородной серы в осадочных образованиях выявлены А. С. Соколовым, А. И. Отрешко, И. И. Алексеенко, Н. П. Юшкиным, А. М. Гайдиным и др. Примером сероносных комплексов являются закарстованные карбонатно-сульфатные толщи миоцена Предкарпатья, бухарского яруса Ферганской долины и Южно-Таджикской впадины, гаурдакской свиты верхней юры Южного Узбекистана и Туркмении (Гаурдакское месторождение), казанского яруса Среднего Поволжья, кунгурского и артинского ярусов Предуралья, нижнего и среднего кембрия Сибирской платформы.

Россыпные месторождения золота, алмазов, платины, касситерита приурочены к карстовым воронкам, котловинам, эрозионно-карстовым депрессиям. которые являются естественными ловушками концентраторами акцессорных минералов. Г. А. Максимович А. М. Кропачев выделяют карстовые впадины как особый вид механических барьеров. Такие месторождения имеются на Урале, Енисейском кряже, в Южной Якутии и других районах. По данным И. С. Степанова и Г. Н. Сычкина, на западном склоне Урала выявлено свыше 50 эрозионно-карстовых депрессий длиной от 2 до более 100 км, к которым приурочены погребенные россыпи.

Классификация россыпей древнего карста, методы изучения и комплекс критериев их прогнозирования освещены в монографии «Древний карст и его россыпная минерагения» (М.: Наука, 1985). С древними карстовыми понижениями в известняках и доломитах связаны многочисленные месторождения боксита, железной и марганцевой руды. Наибольшее значение для народного хозяйства имеют месторождения боксита. Им посвящена монография Д. Бардошши «Карстовые бокситы» [1], работы Г. И. Бушинского и др. Известны карстовые континентальные и морские месторождения боксита на Урале,

Салаирском кряже, в Средней Азии, Румынии, Венгрии, Югославии, Италии, Франции и т. д. На Северном Урале в районе месторождения Красная Шапочка закарстованы известняки нижнего девона, мощность которых достигает 800 м. В кровле известняков имеются карстовые понижения глубиной

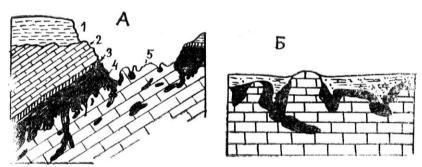


Рис. 25. A — типичный разрез рудного пласта боксита (зарисовка стенки карьера) на Северном Урале (по И. А. Любимову): I — четвертичная глина, 2 — известняк среднего девона, 3 — бокситы зеленовато-серые, 4 — бокситы красные, 5 — известняк рифогенный нижнего девона; E — месторождение железных руд (по В. А. Обручеву)

бокситовый Ниже боксит ДΟ 10 м. гле залегает пласт бокситоподобные породы выполняют многочисленные трещины, карры, щели шириной до 1-2 м (рис. 25). На Ямайке в 1942 г. открыты богатые месторождения боксита. Форма бокситовых залежей. закарстованной поверхности залегающих на известняков. линзообразная и карманообразная. Глубина воронок и котловин достигает 30 м. Обычно мощность разрабатываемых залежей 3-10 м. Запасы отдельных месторождений колеблются от нескольких тысяч до многих миллионов тонн.

Залежи торфа в карстовых впадинах встречаются в Архангельской, Владимирской, Ивановской, Пермской областях и Башкирской АССР. Известны месторождения торфа карстового типа на Кубе, в Ирландии, Югославии и др. На Кубе карстовые торфяники расположены по побережью. Наиболее значителен массив Сьенага-де-Сапата в полье среди мезозойских известняков, длина которого более 100 км, ширина — до нескольких десятков километров. Торф низинного типа имеет мощность до 10 м. Промышленные запасы около 500 млн. т или 55 % всех запасов торфа на Кубе.

Карстовый тип угольных залежей впервые выделен А. К. Матвеевым. Наиболее часто к карстовым впадинам приурочены

залежи и месторождения бурого угля. В Южноуральском бассейне залегает в карстовых воронках, котловинах VГОЛЬ эрозионно-карстовых депрессиях длиной в несколько километров и глубиной 200-300 м в известняках и гипсоносных отложениях нижней перми. Аналогичные месторождения, по данным Г. А. Максимовича и Прикаспии (Урало-Каспийский И. М. Тюриной, имеются в буроугольный бассейн), Днепровско-Донецкой впадине. Бурый уголь карстовых впадин встречается в Польше, Венгрии, ГДР, ФРГ и США. Все месторождения каменного угля карстового типа приурочены к карбонатным породам. Примером являются Черемховское Ныгдинское месторождения в пределах Иркутского бассейна. Залежи угля карстового типа отличаются сложным строением, многопластовостью, линзообразной формой угольного пласта.

Месторождения и непромышленные скопления фосфоритов карстового типа отмечены в карстовых понижениях, полостях и пещерах карбонатных пород. Реже они связаны с гипсовым карстом. Г. А. Максимович характеризует три типа карстовых фосфоритов: 1) первичные биогенные — залежи гуано, костяные, костяные брекчии; 2) вторичные биогенно-метасоматические — островные, пещерные; 3) вторичные остаточно-метасоматические. Наибольшее практическое значение имеют последние. Они образуются в результате выветривания известняков или мела и накопления рассеянных в них фосфатов в воронках и других карстовых понижениях кровли карстующихся пород (Ашинское месторождение в Башкирии, месторождения Северной Франции, Льежа и Монса в Бельгии).

Важнейшими полезными ископаемыми закарстованных карбонатных толщ являются нефть и газ. Из карбонатных отложений извлекается до 60 % добываемой нефти. В карбонатных отложениях различают следующие виды коллекторов: трещинные, поровые, порово-трещинные. карстовые. Карстовые делятся вторично-поровые, каверновые, пещеристые и смешанные. Еще в 1934 г. И. М. Губкин указал на карстовую природу коллекторов иранских месторождений. Изучению некоторых карстовых коллекторов и их нефтегазоносности посвящены работы В. Н. Дахнова, Г. А. Максимовича, И. И. Енцова, В. Н. Быкова, И. И. Наборщиковой, Л. Ю. Даниловой, Е. М. Смехова и др.

По характеру распространения Г. А. Максимович и В. Н. Быков [27] делят карстовые коллекторы на региональные и локальные (рифовые, останцовые и рифово-останцовые). Региональные карстовые коллекторы широко распространены в карбонатных отложениях Урало-Волжской провинции.

В зоне выветривания в закарстованных породах образуются полезные ископаемые путем привноси элементов из других пород, их инфильтрации и концентрации. Это бораты в гипсе, железо, марганец, цинк, свинец, медь, ванадий и другие металлы. В. А. Обручев выделял их в особый карстовый тип рудных месторождений коры выветривания. Гидротермокарстовые полости могут быть заполнены различными рудными минералами.

Минеральные воды в карбонатных, сульфатных и соляных породах формируются в различных гидрогеохимических зонах. Карбонатные закарстованные породы зоны активного водообмена содержат значительные запасы пресных подземных вод, пригодных для водоснабжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Карстующиеся породы слагают около трети площади суши. При благоприятных геотектонических и климатических условиях в них проявляется активный карст. Развитие карста исторически связано с основными этапами геологической истории земной коры: седиментацией карстующихся пород, диагенезом и последующим выходом их на поверхность в результате тектонических поднятий, закарстовыванием и образованием как поверхностных, так и подземных карстовых форм. В периоды тектонических опусканий закарстованных массивов карстовые формы и полости заполняются терригенным и хемогенным материалом. На закарстованной поверхности отлагаются более молодые осадки. Погруженные карстовые коллекторы могут вмещать минеральные подземные воды, нефть и газ.

На основе палеогеографического анализа карбонатных толщ – по наличию закарстованной кровли с каррами, понорами, воронками, колодцами, котловинами, польями и останцами, вторичной пористости, кавернозности и пещеристости пород, находящихся ниже этой поверхности на несколько десятков и сотен метров – можно установить древние эпохи карстообразования, с которыми генетически связаны определенные типы полезных ископаемых. Палеокарстовый анализ позволяет объяснить резкую фациальную изменчивость некоторых участков в общем-то однородных карбонатных толщ. Например, древний погребенный останцовый рельеф представляет собой чередование выступов трещиноватых и пещеристых, особенно в основании, известняков с песчаноглинистыми породами.

На наличие древнего карста в сульфатных и соляных породах указывает замещение их на отдельных участках карстовыми

брекчиями или полное исчезновение в разрезе. Особенности погребенного рельефа кровли карстующихся пород и закономерности распределения полостей в толще пород должны учитываться при разведке и эксплуатации полезных ископаемых.

Историко-геологический подход необходимо использовать при исследовании современного карста. Карстовые области и районы – это исторически сложившиеся участки земной коры (геосинклинальные, платформенные) c определенным сочетанием vсловий (геотектонических. литологических) и факторов (климатических) карстообразования. проявляющихся В особенностях гидрографии, гидрогеологии, обусловливающих тип карста и его эволюцию. Каждый тип карста характеризуется определенным комплексом признаков, которые должны учитываться при мелко- и крупномасштабном районировании и инженерно-геологической оценке закарстованных территорий.

ПИТЕРАТУРА

- 1. Бардошии Д. Карстовые бокситы. М., 1981.
- 2. Васильев И. Н., Задорожная Л. П. Задачи и особенности исследования литологии и трещиноватости горных пород в карстовых районах. В кн.: Гидрогеология и карстоведение. Пермь, 1977, вып. 8.
 - 3. Вологодский Г. П. Карст Иркутского амфитеатра. М., 1975.
 - 4. *Гвоздецкий И. А.* Карст. М., 1954.
 - 5. Гвоздеикий Н. А. Карстовые ландшафты. М., 1979.
 - 6. *Гвоздецкий Н. А.* Карст. М., 1981.
 - 7. Горбунова К. А. Карст гипса СССР. Пермь, 1977.
 - 8. Горбунова К. А. Морфология и гидрогеология гипсового карста. Пермь, 1979.
- 9. Дорофеев Е. П. Провалы Ледяной горы. В кн.: Карст и гидрогеология Предуралья. Свердловск, 1979.
 - 10. Дублянский В. Н. Карстовые пещеры и шахты горного Крыма. Л., 1977.
- 11. Дублянский В. Н., Илюхин В. В. Крупнейшие карстовые пещеры и шахты СССР. М., 1982.
- 12. Егоров С. В. К характеристике карста Кубы. В кн.: Гидрогеология и карстоведение. Пермь, 1971, вып. 4.
 - 13. Зайцев И. К. Вопросы изучения карста СССР. М., 1940.
 - 14. Золотарев Г. С. Инженерная геодинамика. М., 1983.
- 15. Зубащенко М. А. Карст Северного Вьетнама. Изв. Воронеж, отд. Геогр. об-ва СССР, 1961, $\mathbb N$ 3.
 - 16. Карст Дальнего Востока и Сибири. Владивосток, 1980.
 - 17. Карстовые явления в районе города Дзержинска Горьковской области. М., 1960.
 - 18. Кикнадзе Т. З. Карст массива Арабика. Тбилиси, 1972.
- 19. Климчук А. Б., Рогожников В. Я., Ломаев А. А. Карст массива Кырктау (Зеравшанский хребет, Тянь-Шань). Киев, 1981.
- 20. *Кожевникова В. Н.* Методика оценки устойчивости закарстованных территорий. Инженерная геология, 1984, № 2.
 - 21. Короткевич Г. В. Соляной карст. Л., 1970.
 - 22. Кутепов В. М. Формирование напряженного состояния массивов

85 Laborator

- горных пород на закарстованных территориях. Инженерная геология, 1983, № 1.
- 23. Лебедев В. Г. Геоморфологические наблюдения в карстовой области провинции Гуанси (Южный Китай). В кн.: Спелеология и карстоведение. М., 1959.
 - 24. Лукин В. С., Ежов Ю. А., Карст и строительство в районе Кунгура. Пермь, 1975.
 - 25. Лыкошин А. Г. Карст и гидротехническое строительство. М., 1968.
 - 26. *Максимович Г. А.* Основы карстоведения. Пермь, 1963, т. I; 1969, т. II.
- 27. *Максимович Г. А., Быков В. Н.* Карст карбонатных нефтегазоносных толщ. Пермь, 1978.
 - 28. Маматкулов М. М. Карст Западного и Южного Тянь-Шаня. Ташкент, 1979.
- 29. *Мартин В. Я.* Связь карстовых пещер Башкирии с элементами разрывной тектоники. В кн.: Гидрогеология и карстоведение. Пермь, 1977, № 8.
- 30. *Печеркин И. А.* Геодинамика побережий камских водохранилищ. Пермь, 1969, ч. П
- 31. Печеркин А. И., Болотов Г. Б., Катаев В. Н. Изучение тектонической трещиноватости платформенных структур для карстологических целей. Пермь, 1984.
 - 32. Пещеры Пинего-Северодвинской карстовой области. Л., 1974.
- 33. Рац М. В., Чернышев С. Я. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М., 1970.
- 34. Рекомендации по инженерно-геологическим изысканиям и оценке территорий для промышленного и гражданского строительства в карстовых районах СССР. М., 1967.
- 35. *Родионов Н. В.* Инженерно-геологические исследования в карстовых районах. М., 1958.
 - 36. Соколов Д. С. Основные условия развития карста. 1VL, 1962.
- 37. Ступишин А. В. Равнинный карст и закономерности его развития на примере Среднего Поволжья. Казань, 1967.
 - 38. Тинтилозов 3. К. Карстовые пещеры Грузии. Тбилиси, 1976.
- 39. Толмачев В. В., Карпов Е. Г., Хоменко В. П. и др. Механизм деформаций горных пород над подземными карстовыми формами. Инженерная геология, 1982, № 4.
- 40. Торсуев Я. П., Левин С. А. Географические аспекты изучения равнинного карста. Казань, 1980.
- 41. *Хейнсалу Ю., Купцов А.* Об инфильтрационно-инфлюационной способности поверхностных карстовых форм Эстонской ССР. Изв. АН Эстонской ССР. Сер. геол., 1981, т. 30, № 2.
- 42. Цыкин Р. А., Цыкина Ж. Л. Карст восточной части Алгае-Саян- ской складчатой области. Новосибирск, 1978.
 - 43. Чикишев А. Г. Проблемы изучения карста Русской равнины. М., 1979.
 - 44. *Щукин И. С.* Общая геоморфология. М., 1964, т. II.
 - 45. Я куч Л. Морфогенез карстовых областей. М., 1979.
- 46. Якушова А. Ф. Карст палеозойских карбонатных пород на Русской равнине. М., 1949, т. 3, вып. 136.
- 47. *Balazs D.* Relief types of tropical karstareas..– Int., geogr. union. Symposium on karst-morphogenesis. Hungary, 1973.
- 48. *Brook G. A.* The limestone pavements of Nahanni. An example of micro-scale labyrinth karst. S. Afr. Geogr. J., 1981, 63, N 1.
- 49. *Brook G. A., Ford D. C.* The origin of labyrinth and tower karst and the climatic conditions necessary for their development. Nature, vol. 275, N 5680.

86 Laboratory

- 50. Corbel Muxart R. Karsts des zones tropicales humides. Zeitschr. f. Geomorph., N. F., 1970, Bd. 14, H. 4.
 - 51. Cvijic /. La geographie des terrains calcaires. Beograd, 1960.
- 52. *Gams* /. The polje: The problem of defination. With special regard to the Dinaric karst. Zeitschr. f. Geomorph., 1978, Bd.. 22, N 2.
 - 53. Geze B., Mangin A. Le karst de Cuba. Rev. geol. dyn. et geogr. phys., 1980, 22, N 2.
- 54. *Goldie H. S.* Morphometry of the limestone pavements of Farleton Knott (Cumbria, England). Trans. Brit. Cave Res. Assoc., 1981, vol. 8, N 4.
- 55. Ftabic P. Necatere znacilnosti kopastego krasa v Sloveniji.– Acta carsol., 1980 (1981), vol. 9.
 - 56. Hallberg G. Sinkholes and ground water in Northeast Jowa. Jowa Geol., 1982, N 7.
- 57. *Hie D. I.* On the genesis of poljas in the Mehedinti plateau.— Rev. roum. geol., geophys. et, geogr., ser. geogr., 1970, t. 14, N 2.
- 58. Kemmerly Ph. R. A time-distribution study of doline collapse framework for prediction. Environ, Geol., 1980, vol. 3, N 3.
- 59. *Kosmowska-Suffczynska D.* The origin of the forms known as poljes. Geogr. polon., 1968. N 14.
- 60. *Lehmann H.* Das Karstphanomen in den verschiedenen Klimazonen. Erdkunde, 1954, Bd. VIII.
- 61. *Miotke F. D.* Karstmorphologische Studien in der glazialiiberformten Hohenstufe der «Picos de Europa», Nordspanien. Hannover, 1968.
- 62. *Miotke F. D.* The Subsidence of the Surface between Mogotes in Puerto Rico East of Arecibo. Caves and karst. Research in Speleology, 1973, vol. 15, N 1.
- 63. *Monroe W. H.* Some tropical landforms of Puerto Rico. Geol. Surv. Prof. Pap., 1980, N 1159.
- 64. *Panos V.* Krasove typy podle hledisek geologickych (k typologii krasu, I).– Acta Univer. Palack. Olomuc. Geographica-geologica, 1978, r. 58, N 5.
- 65. *Panos V.* Klasifikace a terminologie skrapu. Acta Univer. Palack. Olomuc. Geographica-geologica XIX, 1980, t. 14.
- 66. *Putina M.* Karst–related phenomena at the Bertil Glacier, West Spitsbergen. Kras i speleologia. Uniwerzsytet Slaski Katowice, 1982, t. 4 (XIII). -
 - 67. Slovenska kraska terminologija. Ljubljana, 1973.
- 68. Sweeting M. M. Karst of Great Britain. Important Karst Regions of the Northern Hemisphere. Amsterdam; London; New-York, 1972.
 - 69. Zhigan Zang. Karst types in China. Geojournal, 1980, t. 4, N 6.

87 Laboratory

ОГЛАВЛЕНИЕ

введение	3
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАРСТА И КАРСТОВЕДЕНИЯ	6
Карст как геодинамический процесс	6
Явления, морфологически сходные с карстовыми	9
Карстоведение	9
ОСНОВНЫЕ УСЛОВИЯ РАЗВИТИЯ КАРСТА	1
Карстующиеся породы	11
Водопроницаемость карстующихся пород	13
Движение воды в карстующихся породах	19
Растворяющая способность воды и растворимость минералов карстующихся	
	2
	2
МОРФОЛОГИЯ КАРСТА	32
T T T	32
Карры	32
- r	35
	35
T · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3
T T	39
Генезис воронок	4:
Карстовые котловины	53
Карстовые лога	54
Карстовые рвы	5
T	56
Карстовые депрессии	5
Полья	60
	68
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИ ИНЖЕНЕРНО-	
ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ ЗАКАРСТОВАННЫХ ТЕРРИТОРИИ	78
КАРСТУЮЩИЕСЯ ПОРОДЫ И ЗАПОЛНИТЕЛИ КАРСТОВЫХ ФОРМ КАК	
	80
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	84
ЛИТЕРАТУРА	85