

Министерство образования и науки Российской Федерации

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт наук о Земле

КУРС «ОБЩАЯ ГЕОЛОГИЯ»

Учебное пособие

«Карст»

Авторы: Ю.В. Попов, О.Е. Пустовит

Ростов-на-Дону

2015 г.

УДК 551

ББК 26.3

К21

*Утверждено и рекомендовано к печати решением Учебно-методического совета
Института Наук о Земле ЮФУ, протокол № 1 от 18 сентября 2015 г.*

Авторы:

Ю.В. Попов, к.г.-м.н., доцент кафедры общей и исторической геологии Южного федерального университета;

О.Е. Пустовит, главный геолог ООО Изыскательская компания «Визир».

Рецензент: **И.В. Головачев**, к.г.н., доцент кафедры геологии, гидрогеологии и геохимии горючих ископаемых геолого-географического факультета Астраханского государственного университета, Ученый секретарь Астраханского областного отделения Русского географического общества.

Попов Ю.В., Пустовит О.Е.

К21 Курс «Общая геология». Учебное пособие «Карст» - Ростов-на-Дону, 2015. - 64 с. 13 рис., 14 табл.

Пособие относится к комплексу учебно-методических материалов базового геологического курса «Общая геология». В нём приведены основные сведения о карсте и карстово-суффозионных явлениях, условиях и факторах их образования и развития. Изложены основные принципы оценки интенсивности развития карстового процесса, основанные на нормативной документации по инженерным изысканиям для строительства в карстовых районах. Рассмотрены разновидности карста (литологические типы, типы карста по времени образования, по обнаженности и характеру перекрывающих пород, генетические типы (эпикарст, гипокарст, гидротермокарст)) и их специфические особенности. Подробно описаны карстовые формы рельефа, приведены их морфологические признаки и условия образования. Дана характеристика отложений. Приведены общие сведения о карстовых месторождениях.

УДК 551

ББК 26.3

© Попов Ю.В., Пустовит О.Е., 2015
© Южный федеральный университет, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. КАРСТ И КАРСТОВО-СУФФОЗИОННЫЙ ЯВЛЕНИЯ. УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ.....	5
2. РАЗНОВИДНОСТИ КАРСТА И ИХ ОСОБЕННОСТИ.....	21
2.1. Литологические типы карста	21
2.2. Древний и современный карст.....	25
2.3. Типы карста по обнаженности и характеру перекрывающих пород	26
2.4. Генетические типы карста: эпикарст, гипокарст, гидротермокарст.	27
3. КАРСТОВЫЕ ФОРМЫ	34
3.1. Поверхностные карстовые формы рельефа	35
3.2. Подземные карстовые формы.....	45
4. КАРСТОВЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ	49
5. КАРСТОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ	56
ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ.....	58
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ И РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	58

Введение

Учебное пособие относится к комплексу учебно-методических материалов для студентов, изучающих базовый геологический курс «Общая геология».

В пособии приведены основные сведения о карсте и карстово-суффозионных явлениях, условиях и факторах их образования и развития, карстовых формах и карстовых отложениях. Рассмотрены разновидности карста (литологические типы, типы карста по времени образования, по обнаженности и характеру перекрывающих пород, генетические типы (эпикарст, гипокарст, гидротермокарст)) и их специфические особенности. Учитывая многоплановость карстовых явлений (и в ряде случаев неоднозначность их интерпретации) в тексте работы приведены ссылки на рекомендуемые источники, более полно раскрывающие соответствующие аспекты.

При рассмотрении практических аспектов изучения карста основное внимание уделено изложению основных принципов оценки интенсивности развития карстового процесса, основанных на нормативной документации по инженерным изысканиям для строительства в карстовых районах. Подробно описаны карстовые формы рельефа, приведены их морфологические признаки и условия образования. Кратко охарактеризованы особенности формирования карстовых месторождений.

Дополнения и замечания просим направлять по адресу:
*344090 г. Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, 40, Институт наук о Земле ЮФУ,
кафедра Общей и исторической геологии;
e-mail: popov@sfedu.ru*

1. Карст и карстово-суффозионный явления. Условия образования и развития

Под карстом следует понимать совокупность геологических процессов и явлений, вызванных растворением подземными и (или) поверхностными водами горных пород и проявляющихся в образовании в них пустот.

Карстовый процесс сопровождается суффозией, изменением свойств горных пород, деформациями поверхности (провалы, оседания, воронки), приводящими к созданию характерного рельефа местности, формированием особого характера циркуляции и режима подземных вод, изменением морфологии и режима гидрографической сети.

Возникновение и развитие коррозионного процесса и образование карста обусловлено наличием растворимых горных пород (известняки, доломиты, мел, гипсы, ангидриты, каменная соль и т.п.), их водопроницаемостью (пористостью и трещиноватостью), присутствием движущихся вод и их растворяющей способностью. Существенное влияние оказывают геологическое строение территории, рельеф местности, характер растительности и климат.

Различная растворимость пород обусловлена энергией кристаллических решеток слагающих их минералов (для каменной соли эта величина составляет 183 ккал/моль, она в 3,5 раза меньше чем у гипса (650 ккал/моль), и в 4 раза меньше чем у кальцита 700 ккал/моль) и крупностью частиц (мелкие зерна при всех прочих равных условиях растворяются быстрее).

Среди внешних факторов на растворимость минералов существенно влияют общая минерализация и химический состав растворяющих вод, а также давление (согласно опубликованным В.Н. Дублянским данным, повышение гидростатического давления дистиллированной воды в диапазоне 1-50 атмосфер приводит к увеличению растворимости кальцита с 0,173 до 0,638 г/л).

Среди карстовых вод, видимо, наиболее распространены слабо минерализованные вадозные воды, насыщающиеся в процессе

инфильтрации через почвенный слой свободной углекислотой, а также органическими кислотами, обменным водородом и другими веществами, увеличивающими их агрессивность. Источником углекислоты (и иных агентов коррозии) в водах могут выступать кроме того выветривающиеся породы и руды, выбросы промышленных предприятий. Дополнительный вклад в повышение агрессивности вадозных растворов могут вносить поступающие морские воды (насыщенные NaCl , MgCl_2 , Na_2SO_4 , влияющими на кинетику растворения известняка), воды болот, насыщенные органическими кислотами, микробиологическая деятельность, продуцирующая многочисленные органические соединения и многие другие факторы. Другим источником вод выступают глубинные термальные растворы, связанные с постмагматическими и метаморфическими процессами; это горячие (до первых сотен $^{\circ}\text{C}$) напорные воды, характеризующиеся высокой минерализацией и химической агрессивностью.

Два принципиально разных источника вод (с присущими им гидродинамическими, химическими и пр. различиями) позволяют разделять карстовые явления на *экзокарстовые* и *эндокарстовые*. Экзокарстовые обязаны своим развитием водам экзогенного происхождения - главным образом это проникающие с поверхности вадозные воды (инфильтрационные - просачивающиеся с поверхности через рыхлые породы; инфлюационные - проникающие вниз по трещинам и пустотам; конденсационные - образующиеся из пара), в меньшей степени седиментационные (погребенные в осадках). Эндокарстовые явления (или *гидротермокарст*) связаны с напорными горячими восходящими водами, движущимися из глубин к поверхности.

Важную роль, и притом двоякую, на развитие экзокарста оказывает растительный покров: с одной стороны, лесная подстилка и гумус обогащают воду свободной углекислотой, увеличивая ее растворяющую способность, с другой - глинистый элювий, образующийся на покрытых растительностью территориях, уменьшает инфильтрацию и размывающую силу поверхностных вод.

Гидрогеохимическая оценка интенсивности развития карстового процесса проводится по степени агрессивности подземных вод по отношению к карстующимся породам, т.е. количеству воднорастворимой породы, способной перейти в раствор, и по количеству воднорастворимой горной породы, выносимой подземными водами с единицы площади, или объема карстующихся пород в единицу времени (СП 11-105-97, ч. II, п. 5.4.10).

Наличие движущейся воды является обязательным условием проявления и развития карста. В результате движения карстовых вод возникает водообмен, интенсивность которого характеризуется отношением годового расхода всех карстовых источников и разгружающихся вод, к общему объёму подземных вод карстующегося массива или его частей. Численная величина коэффициента водообмена зависит от водопроницаемости пород, условий дренажа и питания карстовых вод, климатических условий и других факторов.

По отношению к подземным водам карстующиеся породы следует подразделять на залегающие в зоне аэрации, в зоне водонасыщения, а также в переходной зоне колебания уровня карстовых вод, которая в определенных условиях может составлять десятки метров и являться определяющей для оценки карстоопасности.

В каждом массиве, сложенном целиком или частично карстующейся породой, есть области питания, движения и разгрузки подземных вод (рисунок 1). В области питания экзокарста атмосферные осадки, воды поверхностного стока поглощаются трещинами по нормали и отводятся вглубь массива. В области движения вода движется по вертикальным каналам и трещинам (зона вертикальной циркуляции), заполняя их эпизодически. На менее проницаемой породе образуется горизонт карстовых вод (зона горизонтальной циркуляции). В некоторых случаях вода в этой зоне движется по разобщенным каналам. Промежуточное положение занимает зона сезонных колебаний уровня карстовых вод. В нижних частях массивов карстовые воды могут приобретать напор и разгружаться по восходящим каналам в зоне сифонной циркуляции. Область разгрузки

включает участки выхода карстовых вод за пределы карстующейся породы. Разгрузка карстовых вод может быть наземной или родниковой, субаквальной на дне озер, рек, морей и подземной - в виде перетока карстовых вод в некарстующийся отложения.

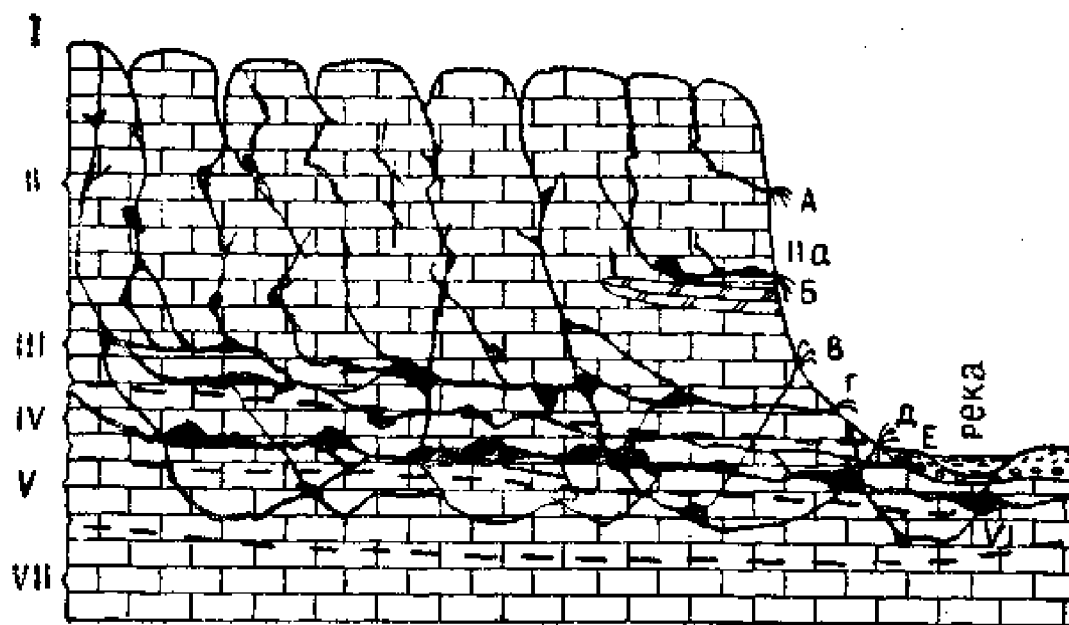


Рисунок 1 - Схема гидродинамических зон карстового массива, прорезанного рекой (по Г.А. Максимовичу, 1958).

Условные обозначения: I – зона поверхностной циркуляции, II – зона вертикальной нисходящей циркуляции; IIa – подзона подвешенных вод на местных водоупорах, III – зона колебания уровня карстовых вод или переходная, IV – зона горизонтальной циркуляции, V – зона сифонной циркуляции напорных вод, VI – зона поддолинной или подрусловой циркуляции, VII – зона глубинной циркуляции. Карстовые источники зон циркуляции: A – вертикальной нисходящей, B – подвешенных вод, B-D – сифонной, Г - переходной, E – разгрузка вод зоны горизонтальной циркуляции в речные отложения.

Глубинные воды эндокарстовых массивов движутся, напротив, из глубин к поверхности. При снижении напора эти восходящие воды разгружаются в горизонтальной плоскости (как и экзокарстовые воды в зоне горизонтальной циркуляции). Таким образом, гидротермокарсту свойственны, видимо, две гидродинамические зоны: нижняя – вертикальной циркуляции, верхняя – горизонтальной циркуляции [10]. Часть вод может достигать поверхности, образуя термальные источники, либо вскрываться скважинами (гидросульфидные, азотные бессульфидные термы, углекислые воды).

Одним из самых важных условий развития карста является степень водопроницаемости пород, обусловленная размером и количеством сообщающихся между собой пор, каверн, трещин, а также разрывных нарушений разного порядка. Чем более водопроницаема порода, тем интенсивнее развивается процесс растворения (таблица 1). Наилучшие условия в этом отношении создаются в трещиноватых породах, особенно при наличии трещин шириной не менее 1 мм (при которой происходит свободная циркуляция воды).

Таблица 1

Подразделение горных пород по степени водопроницаемости закарстованности и трещиноватости (по Ломтадзе, 1977) [11].

Горные породы	Коэффициент фильтрации, м/сутки	Удельное водопоглощение л/мин
Практически водоупорные, незакарстованные и нетрещиноватые	<0,01	<0,005
Очень слабопроницаемые, слабозакарстованные и слаботрещиноватые	0,01-0,1	0,005-0,05
Слабопроницаемые, слабозакарстованные, слаботрещиноватые	0,1-10	0,05-5
Водопроницаемые, закарстованные и трещиноватые	10-30	5-15
Сильнопроницаемые, сильнозакарстованные и сильнотрещиноватые	30-100	15-50
Очень сильнопроницаемые, сильнозакарстованные и сильнотрещиноватые	>100	>50

Трещины в зависимости от происхождения (литогенетические (диагенетические), тектонические и трещины выветривания) имеют ряд особенностей. Диагенетические трещины, зависящие от литологического состава пород, связаны с отдельными пластами или небольшими пачками слоев. Трещины выветривания характеризуются изменчивостью ориентировки, частым ветвлением и извилистостью. Частота и характер трещин выветривания зависят от состава, текстуры и структуры пород, от строения и ориентировки поверхности обнажения. Степень разрушения пород и частота трещин, вызванных процессами выветривания, с удалением

от дневной поверхности уменьшается. Тектонические трещины, формирующиеся в ходе деформации, величина которой превышает предел прочности массива пород, образуют ориентированные по одному плану в породах различного состава системы (парагенезисы трещин отрыва, скалывания и иногда сплющивания), контролируемые характером поля деформации. По тектоническим крутопадающим зонами трещиноватости и разломам формируются постепенно увеличивающиеся карстовые полости рядов: щель → труба → колодец → шахта → пропасть; щель → труба → ход → коридор → зал → тоннель → подземный каньон → обвальный зал. По пологим: щель → труба → ход → лаз → подземная долина или обвальнопластовый зал. На поверхности зоны трещиноватости контролируют водотоки, а фильтрация из них вглубь карстового массива приводит к интенсивной коррозии, нередко сопровождающейся образованием глыбовых навалов.

Методики изучения трещиноватости пород детально рассмотрены в соответствующих пособиях [16, 17, 18]. В изучении трещиноватости широко применяют геофизические исследования, задачами которых является обнаружение и картирование трещиноватых зон, разделение между собой участков пород с открытыми и кольматированными¹ трещинами, оценка мощности и состояния зоны выветривания, локализация отдельных выщелоченных пустот или их систем и, наконец, определение глубины залегания базиса коррозии [15].

Степень трещиноватости горных пород характеризуется следующими основными характеристиками: модулем трещиноватости, блочностью и коэффициентом трещинной пустотности.

Интенсивность карстообразования определяется и мощностью карстующихся пород. При малой мощности исключается возможность возникновения больших пустот. Более того, маломощные слои растворимых

¹ Кольматаж – естественное или искусственное вмывание (проникновение) глинистых и тонкозернистых частиц в пустоты горных пород, изменяющие их влагоемкость и водопроницаемость.

в воде пород часто переслаиваются с глинами, иногда перекрываются глинистыми отложениями, что препятствует циркуляции воды.

В породах прикрытых, изолированных с поверхности более молодыми водонепроницаемыми слоями, карст (связанный с вадозными водами) развивается слабо или вообще не образуется, в отличие от пород, обнаженных или прикрытых рыхлыми водопроницаемыми породами малой мощности или почвенно-дерновым покровом. В горизонтально залегающих породах карст развивается главным образом по их простиранию, в крутонаклонных – на глубину, а в моноклиально залегающих - как по простиранию, так и по падению.

Важную роль в развитии карста играет климат. Относительно большое количество осадков, особенно в виде дождей, и малое испарение определяют повышенные значения поверхностного и подземного стока, большую интенсивность водообмена и циркуляции воды в приповерхностных горизонтах горных пород и соответственно развитие процессов растворения и выщелачивания. Следовательно, отмечается рост интенсивности карста при переходе от районов с сухим климатом к тропикам и субтропикам.

Количество осадков и величина стока – важнейшие факторы, определяющие интенсивность развития карста при равных условиях растворимости и скорости растворения горных пород.

Значительное влияние на развитие карста оказывает рельеф. Карст встречается как на равнинах, так и в горных странах, но в последних он обычно проявляется сильнее, разнообразнее и охватывает толщи горных пород на более значительную глубину. В горных районах денудационные процессы всегда более интенсивны, поскольку здесь растворимые породы чаще выходят непосредственно на поверхность и быстрее вовлекаются в сферу действия коррозионного процесса. К тому же они значительно дислоцированы, трещиноваты и раздроблены, следовательно, водообмен сильнее, скорости движения подземных вод выше. Все это способствует развитию карста, распространению его на глубину и формированию различных глубинных форм.

На равнинах карстующиеся породы прикрыты толщами рыхлых пород, и поэтому поверхностные формы карста не имеют большого разнообразия, хотя и возникают иногда неожиданно, катастрофически быстро в виде провалов и оседаний.

Наиболее интенсивно карстовые процессы протекают на речных террасах, склонах долин, в краевых частях водоразделов, где покрывающие отложения частично или полностью размывы. Развитию карста способствуют также высокие градиенты подземного потока и выходы подземных вод в руслах рек и береговых откосах (рисунок 2).

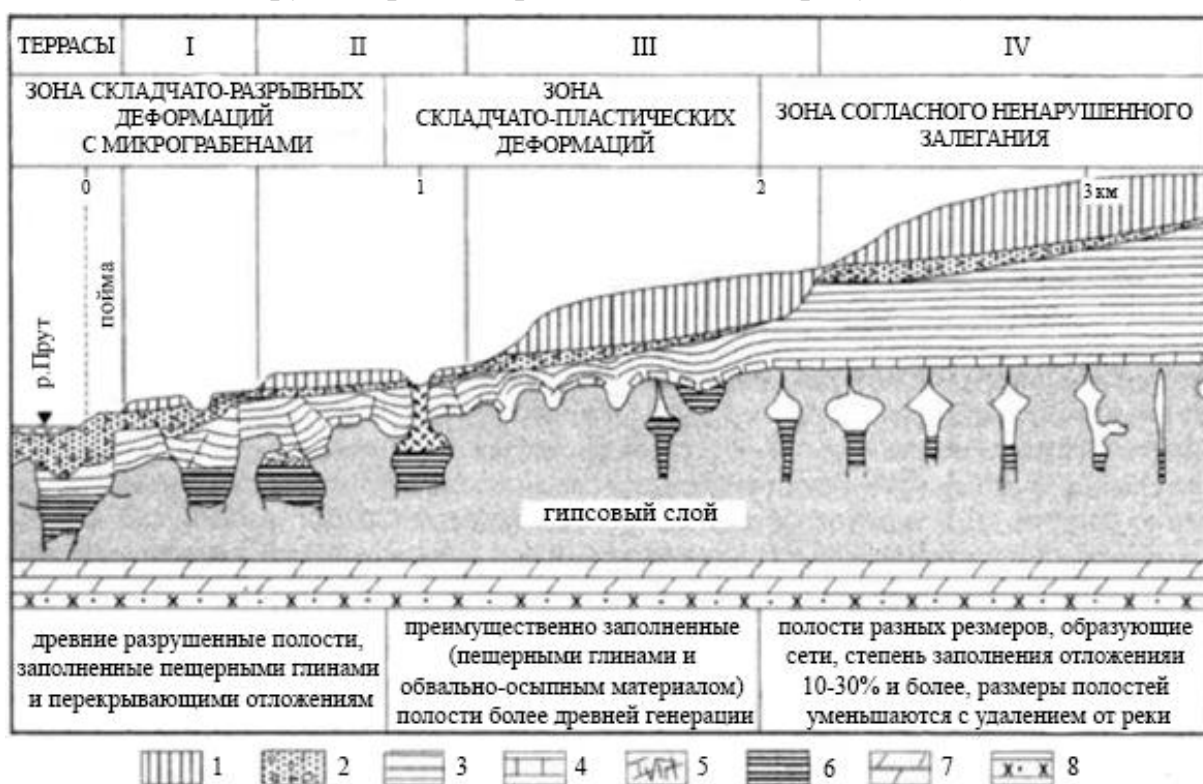


Рисунок 2 – Изменение характера и степени закарстования гипсов в по мере удаления от реки [2].

Условные обозначения: 1 – террасовые суглинки, 2 – аллювий террас, 3 – глины, 4 – слой известняков, деформированные оседаниями глинистые отложения, 5 – отложения подземных пустот, 6 – мергельные слои, 7 – подстилающие гипсы, 8 – карбонатно-песчаниковые отложения.

Гидрологическими и гидрогеологическими проявлениями карста являются: исчезающие ручьи и реки, участки с частичной потерей воды в реках, локальные продольные депрессии, крупные карстовые источники, очаги разгрузки карстовых вод в руслах рек и озер, субмаринные источники,

карстовые озера (поверхностного питания, подземного питания, смешанного питания), подземные реки (таблица 2).

Таблица 2

Схема классификации карстовых рек по особенностям морфологии и стока ((В.А. Балков, 1967 – по Г.А. Максимовичу и Л.А. Владимирову)

I Наземные (поверхностные) водотоки		
А. Постоянные водотоки		Б. Исчезающие реки и ручьи
а. Транзитные реки	1. Частично теряющие сток	д. Исчезающие при вступлении в закарстованную зону е. Пограничные ж. Внутренние (в закарстованной зоне)
	2. Получающие дополнительное питание за счет карстовых вод	
3. Нейтральные		
б. Окраинные реки	4. Истоки – мощные карстовые источники на окраине карстового массива	з. Внутри полей
в. Пограничные реки	5. С повышенным подземным питанием карстовыми водами 6. Частично теряющие сток	
г. Ручьи магистральных речных долин	7. Ручьи с усиленным питанием карстовыми водами	
II Подземные водотоки		
В. Постоянные подземные реки		Г. Исчезающие подземные реки
1. Подземные реки, получающие питание из закарстованного бассейна		4. Подземные реки, исчезающие вследствие раздробления их на мелкие водотоки
2. Подземные реки, возникающие в результате подземного перехвата части воды из русла наземной реки		
3. Подземные реки, возникшие в результате полного поглощения земной реки		

Одной из количественных характеристик карстовых районов является густота речной (таблица 3) и долинной сети. Густота речной сети закарстованной территории – отношение суммарной длины всех рек (в погонных км - ΣL включая и временные пересыхающие водотоки (речные суходолы), к площади, выраженной в км² (F).

$$D = \frac{\Sigma L}{F}, \text{ выражается в км/км}^2$$

Густота долинной (овражно-балочной) сети вычисляется подобным же образом для суходолов-оврагов.

Рекомендуется вычислять отдельно густоту сети постоянных и периодически исчезающих рек, при этом, типичные карстовые районы почти лишены постоянных поверхностных водотоков.

Таблица 3

Классификация густоты речной сети карстовых районов
(по Максимовичу, 1969) [13]

Классы	Густота речной сети карстовых районов, км/км ²
I Незначительная	0-0.10
II Малая	0.10-0.20
III Средняя	0.20-0.30
IV Большая	0.30-0.40
V Очень большая	> 0.40

С карстом внешне сходны явления, возникающие во льду и мёрзлых грунтах (термокарст), в мелкообломочных и пористых грунтах («кластокарст», «глинистый карст», механическая суффозия, просадки); в их развитии основную роль играют физические процессы — механическое воздействие движущейся воды, таяние льда и пр. Процессы, связанные с выщелачиванием солей из рыхлых грунтов, с растворением известкового и гипсового цемента песчаников и конгломератов, составляют группу *карстово-суффозионных явлений*. Вода растворяет только включения или цемент, а основная масса породы (глинистые, пылеватые частицы, песок) удаляется механическим действием движущейся воды — **суффозией**. Развитие суффозии характеризует фильтрационное разрушение, фильтрационную неустойчивость горной породы или заполнителя трещин и карстовых полостей. При *механической* суффозии фильтрующаяся вода отрывает от породы и выносит во взвешенном состоянии целые частицы (глинистые, пылеватые, песчаные); при *химической* - вода растворяет минеральный цемент породы (гипс, соли, карбонаты) и выносит продукты разрушения.

Основные причины развития суффозионных явлений являются либо большие скорости движения фильтрационного потока, либо возникновение в

подземных водах значительных сил гидродинамического давления. Это вызывает отрыв и вынос частиц во взвешенном состоянии. Взвешивание частиц происходит при критическом напоре K_p , который можно определить по формуле $K_p = (D - 1)(1 - n) + 0,5l$, где D - плотность породы (песка); n - пористость породы.

Гидродинамическое давление D , г/см³, действующее по касательной к депрессионной кривой дренируемого потока, определяют по формуле $D = D_0 n l$, где $D_0 = 1$ — плотность воды; n — пористость; l — гидравлический уклон (градиент).

Механическая суффозия возникает при нижеперечисленных условиях (по Н.М. Бочковой (1936г), А.Н. Патрашевой (1938г, 1945г), В.С. Истоминой (1957г), Ломтадзе (1977)):

1) Определенной неоднородности гранулометрического состава породы, при которой возможно передвижение более мелких частиц среди более крупных и их вынос.

Соотношение размеров наиболее крупных (d_{max}) и наиболее мелких (d_{min}) частиц в грунте должно быть не менее 20, т.е. $d_{max}/d_{min} \geq 20$. Соотношение диаметра пор (D) и диаметра преобладающей в грунте фракции (d) должно отвечать условию $D/d \geq 8$.

2) Определенных градиентах потока, вызывающих образование повышенных скоростей фильтрации воды или определенной величины гидродинамического давления в породе.

Гидравлический градиент должен быть больше 5. Наличие такого градиента придает грунтовому потоку турбулентный характер движения, при котором возникают критические скорости, приводящие к выносу отдельных частиц из слоя. С увеличением диаметра частиц возрастают критические скорости: для 0,001мм – 0,02см/с; для 0,01мм- 0,5 см/с; для 0,1мм – 3,0см/с и т.д.

3) Наличие естественных или искусственных областей выноса мелких частиц, переносимых потоком (при выходе пород на поверхность, вскрытии техногенными выработками или при контакте с породами более водопроницаемыми, способных поглощать мелкие частицы, выносимые потоком из пород, подверженных размыву).

Соотношение коэффициентов фильтрации двух смежных контактных

слоев должно отвечать условию $K_c/K_n > 2$, где K_c – коэффициент фильтрации суффозионного слоя; K_n – коэффициент фильтрации подстилающего слоя.

При оценке влияния скоростей потока на условия развития суффозии используют данные таблицы 4.

Таблица 4

Размывающие скорости подземного потока, при которых начинается суффозия (по Д. Джастину, 1936)

Расчетный размер частиц породы, мм	Размывающие скорости, м/мин	Расчетный размер частиц породы, мм	Размывающие скорости, м/мин
5	13,23	0,1	1,83
3	10,37	0,08	1,67
1,0	5,91	0,05	1,31
0,8	5,3	0,03	1,04
0,5	4,18	0,1	0,59
0,3	3,08		

Для определения начальной скорости потока (м/сек), при которой начинается суффозия, нередко используют формулу Зихарда:

$$v_{\text{раз}} = \frac{\sqrt{K_f}}{15}$$

где K_f – коэффициент фильтрации породы, м/сек.

Согласно исследований В.С. Истоминой (1957г.) чем больше неоднородность породы, тем при меньших градиентах начинается суффозия.

Химическая суффозия является начальным этапом суффозии засоленных грунтов. При наличии в грунтах водорастворимых солей последние сначала начинают растворяться, а затем вымываться из грунта. Это приводит к размягчению ослаблению солевых связей, в результате чего отдельные частицы грунта отрываются и выносятся; происходит увеличение пористости, возникают турбулентное движение и повышенные градиенты.

Химическая суффозия может возникнуть в случае соответствующего солевого состава грунтов и определенных гидрогеологических условий и проявиться либо в образовании пустот в грунте, либо в виде суффозионной осадки слоя грунта. Может проходить длительное время и выщелачивать не только карбонаты и другие сравнительно легко растворимые вещества, но и кремнезем.

Независимо от типа суффозия может происходить в глубине массива пород или вблизи поверхности земли. В глубине массива может развиваться

в отдельном слое или толще неоднородных по составу пород; на контакте двух слоев, сложенных породами разного состава; в неоднородном заполнителе трещин, зон тектонических нарушений или карстовых полостей. Вблизи поверхности земли при естественном или искусственном изменении гидродинамических условий суффозия проявляется в формировании воронок депрессии.

Суффозионные процессы часто возникают на склонах речных долин и берегах водохранилищ при быстром спаде паводковых вод или сбросе лишних вод, в местах выхода на поверхность грунтовых вод, на орошаемых территориях.

При прогнозе величины суффозионной осадки следует учитывать: 1) в глинистых грунтах с содержанием глинистых частиц более 40 % осадка практически не проявляется; 2) наибольшая осадка наблюдается при высокой засоленности и большой пористости грунтов; 3) величина и характер протекания осадки во времени во многом зависят от химического состава фильтрующейся в грунте воды.

Суффозия является основой «глинистого карста», связанного с карбонатными и гипсоносными глинами, суглинками и мергелями. Глинистый карст типичен для областей с сухим, полупустынным и пустынным климатом. Формы рельефа напоминают «слепые» карстовые воронки, подземные каналы и пр.

В естественных условиях суффозия развивается сравнительно медленно (годы, десятки лет); под влиянием техногенных факторов её скорость резко возрастает. Наиболее интенсивно она протекает на участках сосредоточенной фильтрации в районах возведения плотин или водохранилищ, при длительных откачках подземных вод из открытых (карьеры, котлованы) и подземных горных выработок.

Необходимо учитывать, что и активность карстовых процессов зависит от антропогенной деятельности: нарушение цельности растительного покрова (вырубка лесов, распашка земель, выпас скота); изменение химического состава и температуры подземных вод за счет сброса промышленных, бытовых и сельскохозяйственных стоков; изменение динамики и химического состава подземных вод при разработках полезных ископаемых; появление избыточных напоров и градиентов вертикальной

фильтрации при подтоплении, создании водозаборов и пр.

Строительство в районах с развитием карстовых и суффозионно-карстовых процессов связано со значительными трудностями, так как пустотность снижает прочность и устойчивость пород и может вызвать недопустимые осадки или даже полное разрушение конструкций. Карстовый процесс особенно опасен для гидротехнических сооружений - через карстовые пустоты возможны утечки воды из водохранилищ, каналов. Для проектирования зданий и сооружений в карстовых районах необходимо проведение детальных инженерно-геологических исследований, которые должны носить комплексный характер (с применением гидрологических, гидрогеологических, геофизических и других методов исследования), что собственно определяется нормативной документацией для строительства (СНиП 11.02-96, СП 11-105-97, СП 47.13330.2011). Категории опасности природных процессов по СНиП 22-01-95 приведены в таблице 5.

Таблица 5

Категории опасности карстовых, суффозионных и термокарстовых процессов (по СНиП 22-01-95 приложение Б) [20]

Показатели, используемые при оценке степени опасности природного процесса (ОПП)	Категории опасности процессов			
	чрезвычайно опасные (катастрофические)	весьма опасные	опасные	умеренно опасные
Карст				
Площадная пораженность территории, %	-	5 - 80	5 - 100	До 5
Частота провалов земной поверхности, число случаев в год	-	0,1 и более	До 0,1	До 0,01
Средний диаметр провалов, м	-	20 и более	До 20	До 20
Общее оседание территории*	-	От незначительных до нескольких мм в год	Незначительно	
Суффозия				
Площадная поверхность территории, %	-	Более 10	2 - 90	Менее 20
Площадь проявления на одном участке, км ²	-	До 10	До 5	До 1
Объем подверженных деформации горных пород, тыс. м ³	-	До 30	До 10	До 1
Продолжительность проявления	-	До 3	0,1 - 30	Более 10

Показатели, используемые при оценке степени опасности природного процесса (ОПП)	Категории опасности процессов			
	чрезвычайно опасные (катастрофические)	весьма опасные	опасные	умеренно опасные
процесса, сут. Скорость развития процесса, сут.	-	Более 10	Более 0,1	Более 0,01
Скорость подъема уровня подземных вод, м/год	-	Более 1	0,5 - 1	0,5
Термокарст				
Потенциальная площадная пораженность территории, %	-	Более 25	25 - 75	Менее 25
Площадь проявления на одном участке, тыс. км ²	-	0,001 - 1	0,001 - 1	0,01 - 1
Объем относительно одновременных деформаций, тыс. м ³	-	1 - 2000	0,1 - 200	0,05 - 50
Продолжительность проявления, лет	-	10 - 20	5	1-5
Скорость развития, см/год	-	15 - 100	5 - 15	-

*Примечание: * - к общим оседаниям следует относить постепенные опускания обширных участков земной поверхности.*

Категории устойчивости территории относительно интенсивности образования карстовых провалов (по СП 11-105-97 ч II, табл. 5.1), принятые по классификации И.А. Саварецкого (1967г), где категория I – очень устойчивая, II - не устойчивая, III - недостаточно устойчивая, IV - несколько пониженная устойчивость, V - относительно устойчивая, VI – устойчивая; и средним диаметрам карстовых провалов (по СП 11-105-97 ч II, табл. 5.2) представлены в таблицах 6 и 7 [21].

Таблица 6

Категории устойчивости территории относительно интенсивности образования карстовых провалов	Интенсивности провалообразования (среднегодовое количество провалов на 1км ² территории (случай/км ² в год)
I	Свыше 1,0
II	Св.0,1- до 1,0
III	Св. 0,05 до 0,1
IV	Св. 0,01 до 0,05
V	До 0,01
VI	Провалообразование исключается

Примечание: К шестой категории устойчивости относятся территории, на которых возникновение карстовых провалов земной поверхности невозможно (из-за отсутствия растворимых горных пород или благодаря наличию надежной защитной покрывающей толщи нерастворимых водонепроницаемых или скальных пород).

Таблица 7

Категории устойчивости территории относительно средних диаметров карстовых провалов	Средние диаметры карстовых провалов, м
А	Свыше 20
Б	Св. 10 до 20
В	Св. 3 до 10
Г	До 3

Основой всех мероприятий инженерной защиты территории является максимальное сокращение фильтрации поверхностных, промышленных и хозяйственно-бытовых вод (водозащитные и противофильтрационные мероприятия) и повышении устойчивости и прочности пород (геотехнические мероприятия) [22].

Изучение карстовых и карстово-суффузионных явлений имеет большое практическое значение. С некоторыми карстовыми полостями связаны месторождения рудных полезных ископаемых. Источником рудных компонентов могут выступать как нерастворимые компоненты карстующегося массива (terra-росса на дне карстовых полостей), так и вещество, привнесённые в карстовые полости из других рудных объектов. С карстовыми полостями связаны некоторые месторождения фосфоритов, никелевых руд, бокситов, железа, марганца, ртути, сурьмы и пр.; отмечаются россыпи золота, касситерита, алмазов и другие полезные ископаемые. Кроме того, с некоторыми пещерами связаны залежи полезных ископаемых, из обводнённых пещер добывают воду. Холодные пещеры-ледники служат в качестве природных «холодильников» и снабжения льдом. Для некоторых районов весьма существенной статьёй доходов служит спелеотуризм. Особенности глубоких пещер – постоянство температуры и влажности, содержание в воздухе ионов, отсутствие аллергенов и пр. - используются в лечебных и бальнеологических целях.

2. Разновидности карста и их особенности

2.1. Литологические типы карста

По составу карстующихся пород выделяют три типа карста:

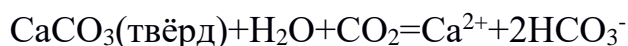
карбонатный (труднорастворимые породы — известняк, доломит, мел, мрамор);

сульфатный (среднерастворимые породы — гипс, ангидрит);

хлоридный, или соляной (легкорастворимые породы — каменная, калийная соли и др.).

Наиболее распространён *карбонатный карст*, развивающийся в карбонатных (известняки, доломиты, мел и пр.) породах. В пределах материков обнажённые и погребённые карстующиеся карбонатные породы занимают до 40 млн. км². Не случайно французский исследователь Э. Мартель предлагал называть карстовые процессы «явлениями в известняках».

Для растворения карбонатов необходимо присутствие в воде углекислого газа, реакция в общем виде может быть описана формулой:



Активному растворению карбонатов способствует наличие в водах минеральных или органических кислот, поступающих из почв, формирующихся за счет реакций в толще пород или биохимических процессов. Так за счет окисления нередко содержащегося в карбонатных породах пирита образуется свободная серная кислота: $2\text{FeS}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 7\text{O}_2 = 2\text{FeSO}_4 + 2\text{H}_2\text{SO}_4$. При этом закисный сульфат в присутствии серной кислоты переходит в сульфат трехвалентного железа, который гидролизуясь, образует дополнительное количество серной кислоты: $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 6\text{H}_2\text{O} + 7\text{O}_2 = 2\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}_2\text{SO}_4$. В результате воздействия серной кислоты на известняк ($\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 = \text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$) на его поверхностях в карстовых полостях образуются кристаллические корочки гипса. Органические кислоты при взаимодействии с CaCO_3 образуют угольную кислоту: например, в ходе реакций: муравьиная кислота - $2\text{HCOOH} +$

$\text{CaCO}_3 = \text{Ca}(\text{HCOO})_2 + \text{H}_2\text{CO}_3$, уксусная кислота – $2\text{CH}_3\text{COOH} + \text{CaCO}_3 = \text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2 + \text{H}_2\text{CO}_3$, щавелевая кислота – $(\text{COOH})_2 + \text{Ca}(\text{OO})_2 = \text{H}_2\text{CO}_3$.
Образующийся в последнем случае оскалат кальция почти нерастворим в воде и выпадает в осадок.

Спецификой карстовых процессов в районах развития болотных образований является то, что инфильтрационные воды, содержащие органические (гуминовые и фульво-) кислоты, воздействуя на карбонатные породы, легко нарушают связность между зернами и почти полностью превращают их в мучнистую массу.

В известняках в зависимости от их чистоты, зернистости и структуры, наличия или отсутствия прослоев других пород карстовые явления развиваются с различной интенсивностью. При растворении известняков с примесью глинистого вещества, а также слоистых толщ карбонатных пород, где слои известняков чередуются с мергелями и тонкими прослоями глин, в качестве остаточного продукта выщелачивания накапливается глинистый элювий, который закупоривает трещины, затрудняя этим циркуляцию вод. Развитие карста продолжается на участках повышенной трещиноватости и вдоль крупных разломов, где сохраняется водопрopusкная способность.

В доломитовых (или доломитизированных) известняках происходит более быстрое растворение кальцита, что приводит к изменению структуры пород, увеличению пористости и уменьшению их прочности. На определенной стадии развития карста разрушение породы начинает количественно преобладать над процессами растворения - образуются рыхлые карбонатные продукты разрушения. За счет преимущественного растворения кальцита, как осадочный продукт накапливается рыхлый осадок - так называемая доломитовая мука, состоящая преимущественно из мелких зерен доломита диаметром 0,25-0,01 мм. Карстовый процесс в доломитах обычно не сопровождается выработкой крупных пустот и пещер, и редко приводит к возникновению поверхностных форм.

Развитие мелового карста, в виду очень низкой водопроницаемости мела, возможно только при наличии трещин. Движение по трещинам агрессивной воды сопровождается химической и механической суффозией.

В известняках и доломитах растворение и механическое разрушение имеют примерно одинаковую интенсивность, тогда как в мелу механическое разрушение поверхности трещин в 4-6 раз интенсивнее, чем растворение, что может приводить к заилению трещин. Особое внимание заслуживают приразломные зоны дробления и участки повышенной трещиноватости, где карстовые явления развиваются весьма активно, с образованием многочисленных подземных пустот типа «лисьих нор» и карстовых провалов. Пещеры в мелу из-за его малой прочности не достигают больших размеров и обычно недолговечны. Поверхностные карстовые формы довольно разнообразны, хотя представлены и неполно. Следует отметить, что меловые породы в значительной степени чувствительны к различным техногенным воздействиям: при сосредоточенных утечках водопроводных и кислых сточных вод происходит быстрое разрушение мела, с превращением его в пластичную или текучую массу.

И. Цвийич (1925, 1960) доломитовый, меловой карст и карст в мергелистых известняках считал мерокарстом, т.е. несовершенным, неполным карстом.

Из некарбонатного карста в природе довольно широко распространён *сульфатный карст* (гипсово-ангидритовый), развитый на площади около 7 млн. км², и *соляной* – до 4 млн. км².

Активность развития *сульфатного карста* в десятки раз превышает активность карбонатного, а *соляной карст* развивается ещё энергичней. Растворение этих пород протекает напрямую, без участия углекислоты и других химических соединений. Но из-за пластичности этих пород ограничена внутренняя циркуляция вод и наиболее активно процесс протекает на контакте с вмещающими породами, где циркуляция вод интенсивнее и по редкой неравномерной системе трещин. Гипсы и ангидриты в основном слабо трещиноваты (трещины редкие, большей частью закрытые), поэтому в кровлю гипсово-ангидритовых толщ карст обычно проникает на глубину от нескольких см до 10-15 м. Состав природных вод, попадающих в гипсы и ангидриты, также является одним из основных факторов, влияющих на скорость растворения пород и,

следовательно, на интенсивность карста. По мере насыщения воды сульфатом кальция карст затухает. Наиболее интенсивно сульфатный карст проявляется в местах поглощения пресных речных вод, разгрузки в сульфатную толщу подземных вод из некарстующихся толщ, в приречных участках карстующихся массивов, где карстовые воды подпитываются речными водами в периоды их высокого уровня. Интенсивное растворение гипсов может происходить и водами повышенной минерализации Cl–Na или SO₄–Na состава, формирующимися на контакте с залежами каменной соли.

Необходимо добавить, что благодаря высокой растворимости гипса, ангидрита и особенно каменной и других легкорастворимых солей при замедленном водообмене происходит быстрое насыщение воды растворённым веществом, и процесс выщелачивания приостанавливается. Интенсивность развития карста в этих породах определяется главным образом длиной путей фильтрации и скоростью движения воды.

Количественной характеристикой степени закарстованности территории является интенсивность провалообразования. Для оценки интенсивности соляного карста наряду с изучением режима подземных вод (активности водообмена, насыщенности соляных растворов), особое внимание следует уделить соляно-купольной тектонике. При этом следует учитывать, что в случаях доступа ненасыщенных вод к соляным толщам, происходит быстрое растворение пород, образуются крупные провалы и происходит общее оседание земной поверхности с формированием мульд оседания.

Таблица 8

Характеристика литологических типов карста
(СП 11-105-97 ч.II, приложение Е) [21]

Литологический тип	Условия распространения и развития	Растворимость пород	Пористость пород, %	Коэффициент фильтрации м/сут	Провалы
Карбонатный	Распространен наиболее широко, развивается медленнее гипсового и соляного	Мала, концентрация CaCO ₃ не превышает n/100мг/л и зависит от свободного CO ₂	От единиц до 30-35	До 200 и более	Преобладают территории с частотой провалов менее 0,01 случая на 1км ² в год; редки участки

					с частотой провалов от 0,01 до 0,1-1 случаев на 1 км ² в год.
Меловой (подтип карбонатного)	Распространен широко, развивается медленно	тоже	До 50 и более	До n*10 и более	Тоже
Сульфатный (часто в сочетании с карбонатным)	Распространен достаточно широко, развивается быстрее, чем карбонатный	Значительна, концентрация CaSO ₄ достигает 7 г/л	Малая, от 0,1 до 6	Практически водопроницаемы, на сильно закарстованных участках – до 200 и более	Распространены участки с частотой провалов более 0,01 случая и до 0,1-1 случаев на 1 км ² в год
Соляной (преимущественно в сочетании с гипсовым, реже с карбонатным)	Распространен лишь в районах соляных месторождений, развивается чрезвычайно быстро	Очень высокая	Малая	Практически водопроницаемы	Достигает одного и более случаев на 1 км ² в год

2.2. Древний и современный карст

По времени образования различаются *древний (пассивный) карст*, завершивший свое развитие (и, как правило, погребенный под более молодыми отложениями) и *современный (активный) карст*, проявляющий себя в образовании новых карстовых форм. Нужно заметить, что определение возраста подземных карстовых полостей является весьма непростой задачей. Методы датирования основываются либо на косвенных геологических признаках, либо на определении возраста минеральных образований на стенах полостей, что дает заведомо заниженные относительно возраста полостей результаты.

Древний или погребенный карст может быть приурочен к разным стратиграфическим комплексам и встречаться на разной глубине от поверхности. Характеризуется отсутствием циркуляции воды. Древние карстовые полости в большинстве случаев заполнены продуктами выветривания, делювиально-пролювиальным материалом, задернованы, покрыты кустарниковой и даже древесной растительностью. При изменении базиса коррозии и других причин пассивный карст может перейти в

активную стадию. При активном карсте степень закарстованности пород продолжает возрастать. Для растущих карстовых форм характерны четкие очертания, циркуляция воды, зияние трещин, отсутствие древесной растительности.

2.3. Типы карста по обнаженности и характеру перекрывающих пород

В зависимости от условий залегания (наличие либо отсутствие некарстующегося покрова над растворимыми породами) различают три типа карста: *открытый* или *голый* (при отсутствии такого покрова), *полуоткрытый* (присутствует водопроницаемый покров) и *закрытый* (присутствует слабопроницаемый покров). Более подробная систематика приведена в таблице 9.

Таблица 9

Схема классификации карста по обнаженности и характеру покровных отложений (по Г.А. Максимовичу, 1960, 1961)

Покровные отложения	Тип карста при региональном развитии	Карст на небольших участках	Примеры данного типа карста
Отсутствуют	Средиземноморский	Голый	Горный Крым, Динарские горы
Незначительный почвенный покров, задернованный	Кавказский	Задернованный	Западный Кавказ
Элювий карстующихся пород	Среднеевропейский	Покрытый или подэлювиальный	Уфимское плато
Аллювий в речных долинах	Камский	Перекрытый, или подаллювиальный	Карст долин рек и бассейне Камы
Осадочные некарстующиеся породы	Русский	Закрытый	Карстовые районы Русской равнины
Базальт и другие изверженные породы	Среднеатласский	Подвулканический	Четвертичные базальтовые породы Среднего Атласа на юрских известняках в районе Азру

В районах покрытого карста характерно наличие разнообразных полостей, размытых фильтрующей водой трещин, колодцев (жерла) размыва, оседаний и обрушений пород, разрушенных и разуплотненных зон, нарушений залегания горных пород в результате их сдвижения и обрушения.

В районах с покрывающей толщей, сложенной нерастворимыми, преимущественно глинистыми водонепроницаемыми породами важную роль в развитие карстовых процессов играет степень их водопроницаемости и защитная способность в отношении проявления карста на земной поверхности. Мощность толщи, как правило, обеспечивающей защиту от возможности проявления карста на земной поверхности, может изменяться от 10-30 м (при выдержанной мощности плотных глин, с отсутствием линз и прослоев песка, супеси, водоносных суглинков, трещин и других нарушений) до 60-100 м (при наличии в покрывающей толще слоев песков, песчаников, мергелей, а также тектонических нарушений).

Наиболее подвержены развитию карстовых процессов площади, покрытые водопроницаемыми отложениями. В несвязных, преимущественно водопроницаемых покрывающих породах (крупнообломочных грунтах, песках, супесях и др.) возможно развитие карстово-суффозионных процессов с вмыванием в карстовые полости рыхлого материала, поступающего из перекрывающего карстующиеся породы образований, и формированием на поверхности воронок значительных размеров.

2.4. Генетические типы карста: эпикарст, гипокарст, гидротермокарст

Существенные различия в условиях развития открытого и закрытого карста дают основания различать соответствующие его генетические типы: *эпигенный карст* и *гипогенный карст*. *Эпигенный карст* развивается в условиях открытого и полукрытого карста, в непосредственной связи с поверхностным питанием, и связан с безнапорными подземными водами, объем и концентрация стока которых возрастает в соответствии гидравлическим градиентом. Развитие такого карста сопровождается формированием преимущественно древовидных подземных каналов, создающих относительно небольшую объёмную карстовую пустотность (в среднем 0,4%) и условия для интенсивного латерального водообмена. Каналы развиваются не равномерно, а пропорционально объёму поглощаемых с поверхности вод.

Коррозионный процесс продолжается до водоупора или уровня подземных вод. Нижним пределом развития, т.е. *базисом коррозии*, чаще всего бывает уровень ближайшей реки, озера или моря, а также поверхность водоупорных пород.

Ниже уровня подземных вод, если они достаточно минерализованы, и поток их движется медленно, карстообразование не происходит. В этой части массива наблюдается цементация трещин за счет выпадения из водного раствора кальцита и (или) других веществ. В связи с этим в карстующемся массиве выделяют *зону карстообразования* и *зону цементации* (рисунок 2).

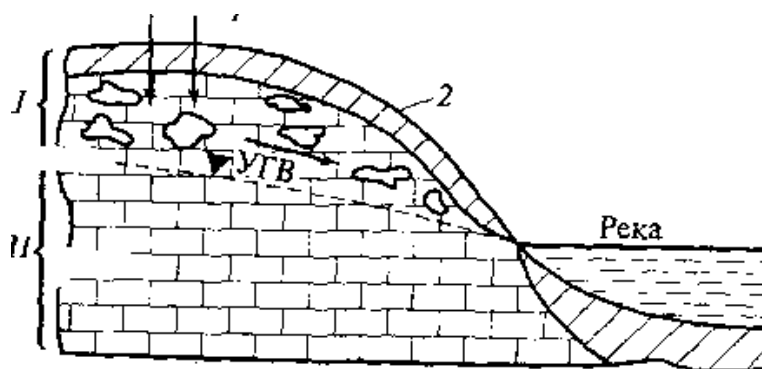


Рисунок 2 – Зоны карстового массива в известняке [1].

Условные обозначения: I – зона карстообразования; II – зона цементации; УГВ – уровень грунтовых вод, стрелами показаны атмосферные воды; 2 – суглинки.

Гипогенный карст не связан напрямую с поверхностным питанием и развивается ниже базиса эрозии в условиях воздействия напорных вод². Растворение пород происходит путем одновременного развития большого числа каналов, приводящего к формированию лабиринтовых пещерных полостей (при наличии равномерной трещиноватости и отсутствии тектонических разломов, определяющих избирательное направление фильтрации вод); объёмная карстовая пустотность в таком случае достигает нескольких процентов. В условиях замедленного водообмена положение зон растворения пород может определяться не только напорным градиентом

² Согласно наиболее употребимым определениям, рассматривается как особый вид карста, лежащий ниже базиса эрозии (Апродов, 1947; Гвоздецкий, 1954). В некоторых работах гипокарст рассматривается как синоним гидротермокарста (Кутырев, Ляхницкий, 1982). (Прим. авторов)

фильтрации вод, но и конвективной циркуляцией, связанной с плотностными градиентами (определяемыми неравномерностью температуры или концентрации).

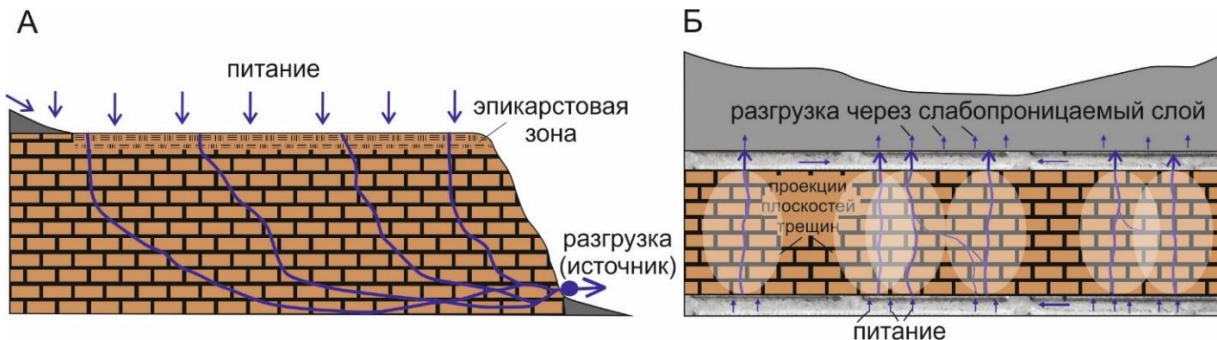


Рисунок 3 – Концептуальное представление водообменных систем эпигенного (А) и гипогенного (Б) карста. Система гипогенного карста показана в варианте артезианского сквозьпластового спелеогенеза в пластовой водонапорной системе (по Климчуку, 2013) [9].

В качестве разновидности гипогенного карста рассматриваются нефтяные коллекторы в известняках.

В эпигенном и в гипогенном карсте воды холодные и имеют экзогенное происхождение и объединяются понятием *экзокарст* (или *холодный карст*).

Специфичным генетическим типом карста является *гидротермокарст* (или *эндокарст, горячий карст*), связанный с выщелачиванием карстующихся горных пород горячими восходящими жидкими и газовой-жидкими растворами с образованием и последующим заполнением полостей³. Представление о процессах растворения пород горячими глубинными, а не вадозными, водами введено ещё на рубеже XIX-XX века (Рошери, 1984; Van Hise, 1904), в 1920-х годах эти представления привлекаются для объяснения генезиса некоторых свинцово-цинковых месторождений (Locke, 1926), позднее в изучение включаются карстологи и

³ Целесообразно привести еще ряд определений гидротермокарста: 1) «процесс образования и последующего заполнения полостей в горных породах под воздействием гидротермальных растворов и их паров» (Дублянский, 1990); 2) «карстовые формы и отложения, образующиеся за счет коррозионного воздействия транспорта горячими водами (при температуре от 300-100 до 50-30°C.») (Щукин, 1980) (Прим. авторов)

геологи-рудники, в 1989 г. при международном союзе спелеологов ЮНЕСКО создана рабочая группа «Гидротермокаст», многочисленные публикации освещают те или иные аспекты явления [6], но и до настоящего времени гидротермокарст изучен недостаточно, даже отнесение ряда полостей и связанных с ним отложений к экзо- или эндокарсту является предметом дискуссий.

Как и холодный карст, гидротермокарст можно подразделить по положению относительно уровня подземных вод, в данном случае термальных. При субаквальном гидротермокарсте развитие полостей происходит ниже зеркала термальных вод, полости нацело заполнены термальными растворами; при субаэральном - выше, полости развиваются за счет растворяющего воздействия конденсирующихся паров гидротерм [8].

В России проявления гидротермокарста известны в Горном Крыму, Соче-Мацестинском районе, Кавминводах, Башкирии, Горном Алтае и других местах.

Наиболее представительным и впечатляющим примером служат пещеры Найка⁴ в Мексике, вскрытые шахтами рудника компании «Industrias Penoles» в сложенной карбонатными породами антиклинальной структуре горной цепи Сьерра Найка. У пещер (к настоящему времени известны четыре пещеры - Espadas, Ojo de la Reina, Velas и Cristales) отсутствуют естественные входы (рисунок 4), они сформировались за счет воздействия горячих минерализованных вод, из которых (при температуре 55-58°C) сформировались гигантские гипсовые кристаллы (рисунок 5). Длина наиболее крупного из 160 обнаруженных кристаллов 11,4 м, объём 5,0 м³, масса более 12 т. Абсолютные датировки этих кристаллов ²³⁰Th/²³⁴U методом дали значения 164±48 тыс. лет и 213±12 тыс. лет; последнее значение, видимо, близко к началу роста кристаллов.

⁴ Более подробную информацию, включая знакомство с галерей уникальных фотографий, можно получить на посвященном пещерам Найка интернет-ресурсе: <http://www.naicagaleria.com/> (Прим. авторов)

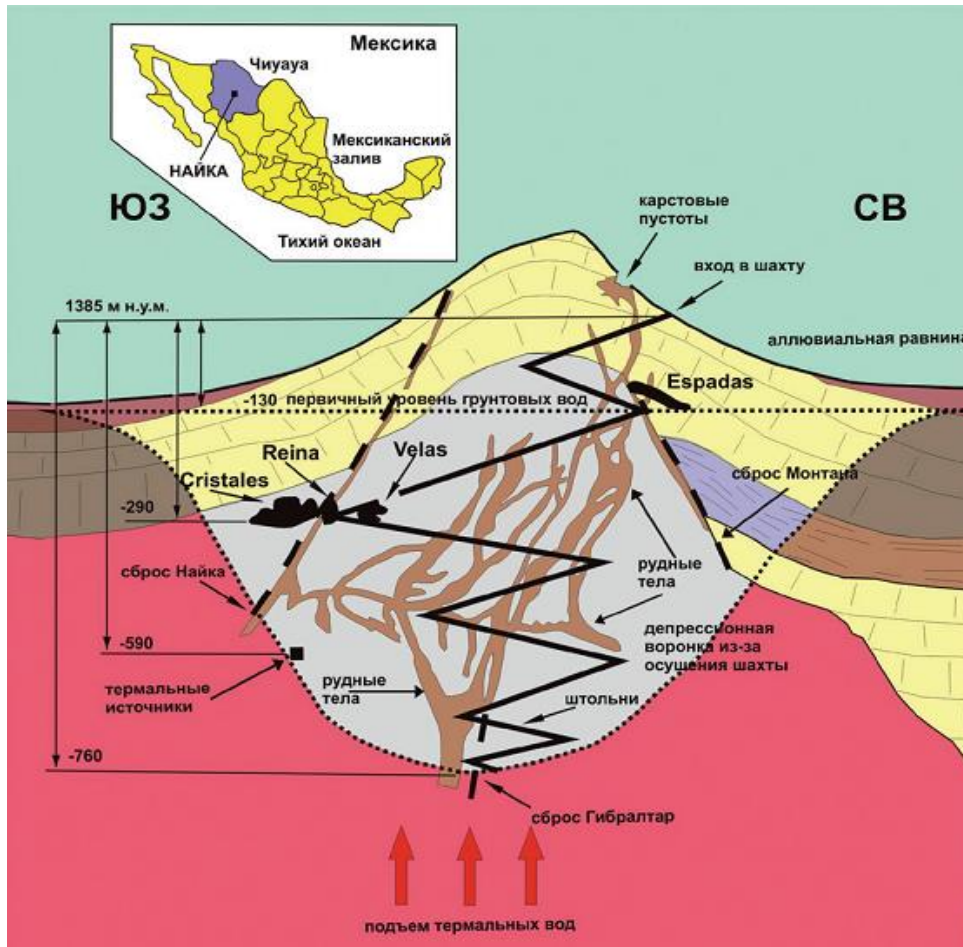


Рисунок 4 – Схема строения шахты Найка, рудных тел, естественных полостей, тесно связанных с главными тектоническими сбросами и уровнем грунтовых вод [12].



Рисунок 5 – Гигантские кристаллы гипса в пещере Кристаллов (Источник: <http://www.naicagaleria.com>).

Критериями отнесения к гидротермокарсту могут выступать следующие особенности: 1) морфологические особенности системы карстовых полостей – преобладание вертикальных полостей (в том числе кольматированных, имеющих гидротермальное заполнение) в нижней части массива и горизонтальных – в верхней; 2) экранирование горизонтальных полостей водоупорными породами сверху 3) минерализация полостей по всему сечению (а не преимущественно в донной, что типично для экзокарста); 4) присутствие минеральных ассоциаций, не типичных для окислительных обстановок (преимущественно сульфидных) с кристаллически-зернистыми структурами; 5) высокие температуры формирования минералов (устанавливаемые методом гомогенизации включений и др.), выполняющих стенки полостей или образующих метасоматические ореолы вокруг полостей (зоны доломитизации, окварцевания, перекристаллизации карбонатов) – температуры формирования кольматолитового материала могут достигать 200-350 °С и выше. Возможно, с гидротермокарстовыми процессами связано формирование довольно своеобразных шаровидных подземных полостей (иногда окруженных радиальной системой трещин). Существуют предположения, объясняющие их образование вскипанием горячего флюида при снижении давления, сопровождающимся резким повышением давления газов.

Все карстовые массивы с течением времени изменяются. Важным фактором в этом выступает характер тектонических движений. При воздымании территории базис карста постепенно смещается вглубь массива; с каждым этапом поднятия связана своя серия полостей, горизонтальная составляющая которых трассирует соответствующий базис карста. При погружении территории горизонтальная составляющая каждой более молодой серии располагается выше по отношению к более древней (рисунок б). В целом, в депрессиях и впадинах при опускании закарстованных территорий и погребении осадками отмечается ослабление карстовых процессов.

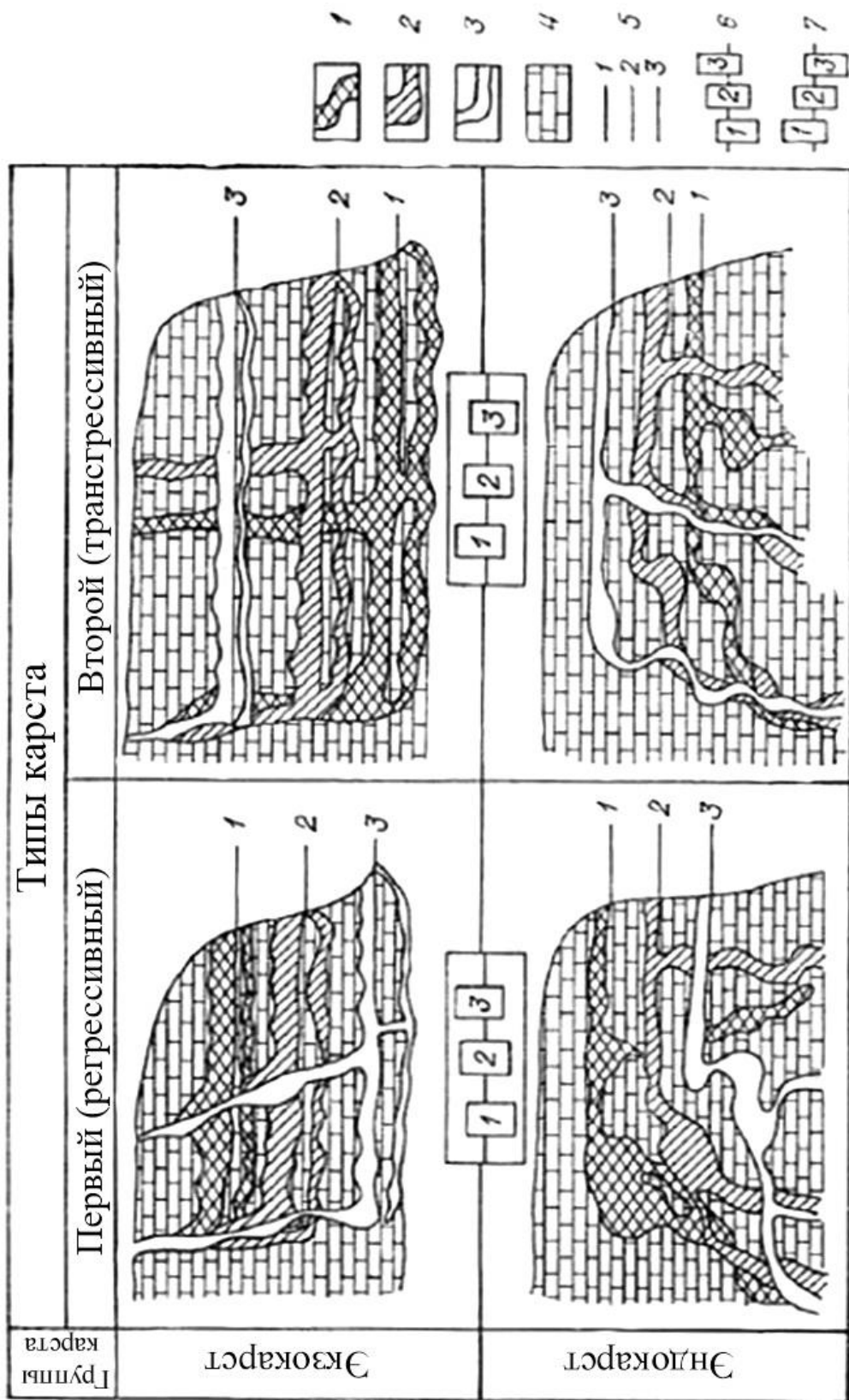


Рисунок 6 – Структурно-динамическая классификация карстовых систем [10]

Условные обозначения: 1-3 – генерации карстовых систем: 1 – ранняя, 2 – средняя, 3 – поздняя; 4 – карстующиеся породы; 5 – положение местного базиса эрозии для соответствующих генераций карстовых систем; 6, 7 – положение карстового массива относительно восходящих (6) и нисходящих (7) тектонических движений.

3. Карстовые формы

Специфика карстового рельефа заключается в преобладающей в нем роли замкнутых отрицательных форм, образующихся при выносе с земной поверхности подземным путем через карстовые пустоты продуктов коррозионного процесса. При этом продукты растворения, выщелачивания и частично суффозионного выноса и размыва могут находиться в растворенном, взвешенном состояниях и даже в виде крупных обломков, образовавшихся при обрушении пород в подземных полостях.

Карстовые формы рельефа подразделяются на *поверхностные* и *подземные* (таблица 10).

Таблица 10

Основные карстовые формы (по Д.С. Соколову, 1962)

Класс (по месту проявления карстовых форм)	Карстовые формы	Процессы, обуславливающие развитие карстовых форм
В растворимых породах		
Поверхностные	Карры субаэральные	Растворение метеорными водами и эрозия на крутых склонах
	Карры и каверны рифов	Растворение при участии морских вод
	Ниши	Растворение и выветривание с участием подмыва
	Воронки: выщелачивания провальные	Растворение Растворение и обрушение
	Долины: слепые полуслепые Котловины и поля	Растворение и эрозия Эрозия и растворение Эрозия, растворение, обрушение
Подземные	Колодцы, шахты и пропасти	Растворение, обрушение, эрозия
	Закарстованные трещины	Растворение
	Пещеры, каналы и прочие полости	Растворение в сочетании с подземной эрозией и обрушением
	Каверны и вторичная пористость	Растворение
В нерастворимых породах (в ходе суффозии)		
Поверхностные	Карстово-суффозионные воронки, карстово-эрозионные овраги	Суффозия с выносом материала в подземные карстовые полости
	Карстово-эрозионные поля	Эрозия с выносом ее продуктов в подземные карстовые полости
Подземные	Карстово-суффозионные провальные шахты и воронки, карстово-суффозионные каналы и полости	Суффозия с выносом материала в подземные карстовые поля, обрушения

3.1. Поверхностные карстовые формы рельефа

К поверхностным карстовым формам относятся карры, желоба и рвы, воронки, блюдца и западины, котловины, поля, останцы, навесы, ниши и др.

Карры являются микроформами карстового рельефа и представляют собой рытвины и борозды как правило глубиной от нескольких см до 1-2 м и более, развивающиеся на обнаженной или частично задернованной поверхности. Борозды и разделяющие их гребни либо протягиваются почти параллельно друг другу, совпадая с направлением уклона рельефа или падения слоёв горных пород, либо располагаются хаотично, ветвятся и сливаются друг с другом. Морфологически карры подразделяются на желобковые, стенные, лунковые, трубчатые (в виде трубообразных цилиндрических углублений в гипсах), каменицы, карры в виде следов, бороздчатые, меандровые и трещинные. Наиболее крупные по масштабности проявления стенные карры - крупные вертикальные борозды и желоба, образованные на крутых известняковых обрывах (наиболее выразительны в обрывах останцов тропического карста), межпластовые (рисунок 7) и русловые (рисунок 8) карры.

Образование карров связано с корродирующим воздействием дождевых, талых, почвенных и др. вод и наличием на поверхности пород трещин различного генезиса. При отсутствии трещин карры образуются вследствие избирательного воздействия агрессивных вод. Избирательность коррозии обусловлена: особенностями карстующейся породы – структурой и текстурой, анизотропностью химического состава породы, изменчивостью литологии, наличием стяжений сульфидов, кремнезема и др., условиями залегания и геометрией обнажения слоев породы, изменением химизма и агрессивности поверхностных вод и др.; положением карстующихся поверхностей (субгоризонтальным, субвертикальным, наклонным); физико-географической обстановкой каррообразования – наличием снежников, регулирующих поступление талых вод, растительностью и рядом других подобных факторов.

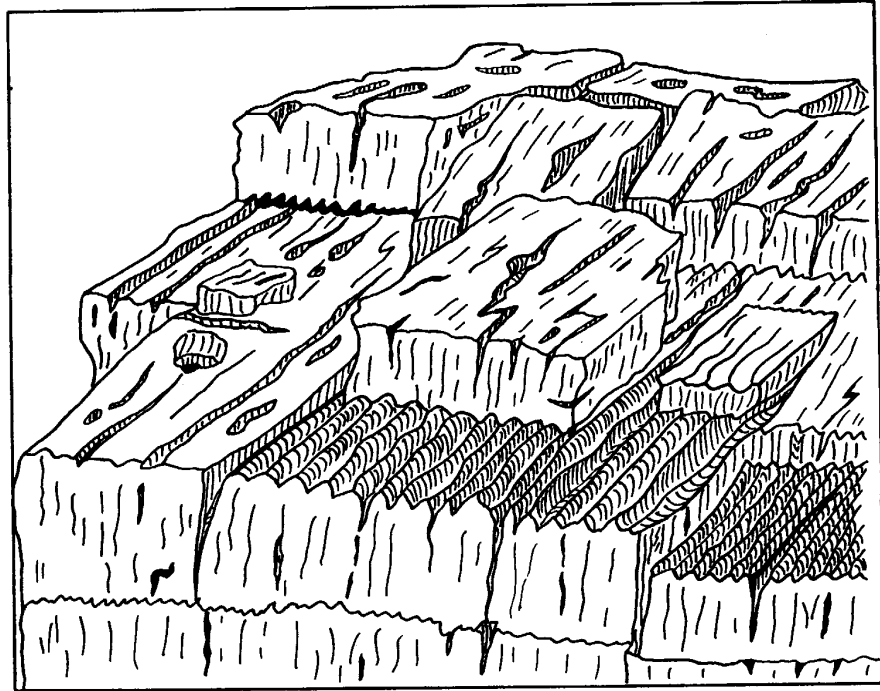


Рисунок 7 - Межпластовые карры (по Б.А. Вахрушеву и др., 1991), имеющие бороздчатую и лункообразную морфологию.

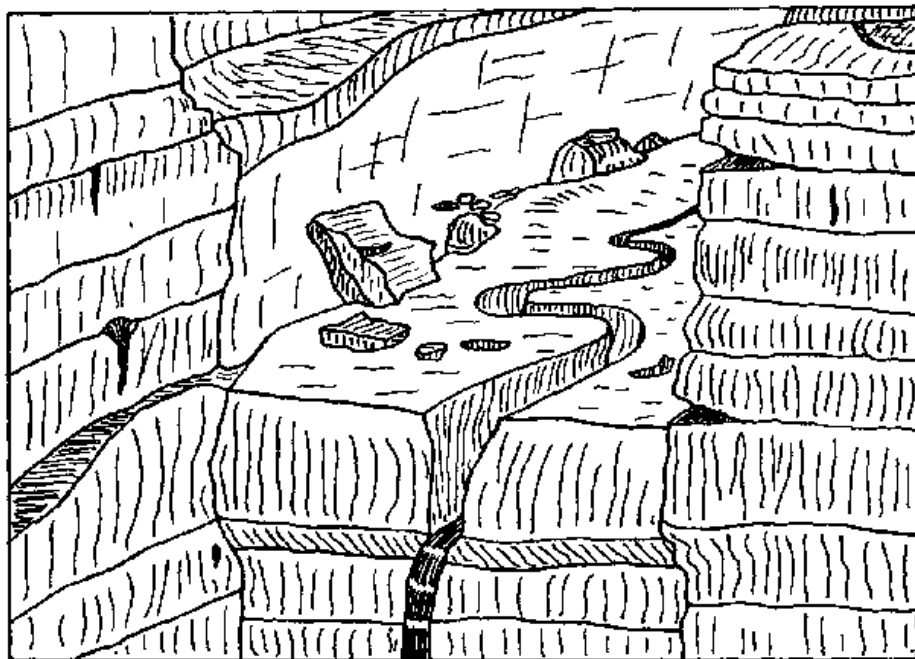


Рисунок 8 - Русловой карр в днище карстовой долины в пределах Бзыбского массива (по Вахрушеву Б.А. и др., 2001) [3].

Обширные площади, покрытые каррами, называют карровыми полями.

Карстовые желоба и рвы представлены линейно вытянутыми, с крутыми бортами и выположенными обвальными-осыпными аккумулятивными днищами, понижениями карстового рельефа. Развиваются вдоль раскрытых тектонических или гравитационных (трещин разгрузки, бортового отпора и др.) трещин и сопровождаются коррозионной моделировкой. Часто карстовые рвы формируются в тыловых частях крупных блоков отседания (коррозионно-гравитационные рвы) или сбросовых ступеней (коррозионно-тектонические рвы). Протягиваются на десятки и сотни метров, а иногда и на несколько километров, достигая различной ширины и глубины. На концах они замкнуты, на дне могут иметь многочисленные углубления.

Навесы и ниши часто представляют собой чисто поверхностные образования, возникающие из-за более интенсивного выщелачивания отдельных слоев или пачек слоев стекающими по обрыву водами, при большом значении биохимического выветривания (под действием поселяющихся на периодически увлажняемых поверхностях низших растений). В процессе образования более глубоких ниш существенное значение приобретают коррозия за счет вод, просачивающихся по трещинам в горной породе, и, кроме того, обрушение глыб породы из-за расширения трещин вследствие выщелачивания их плоскостей.

Воронки - наиболее распространённая карстовая форма - замкнутые впадины, образующиеся в результате провалов и локальных оседаний грунта. Размеры типичных воронок колеблются от 1-2м до 50-200 м в поперечнике, по глубине от 0,5-2м до 10-20м. Нечетко выраженные мелкие воронки называют *блюдцами* и *западинами*.

Воронки имеют разнообразную форму: в плане - коническую, котлообразную, блюдцеобразную либо в виде ям неправильной формы и т.д., в поперечном сечении бывают симметричными, но часто ассиметричными, с пологими или крутыми склонами.

Размеры и форма карстовых воронок зависят от состава карстующихся пород, их трещиноватости, слоистости, от рельефа и др.

факторов. Воронки, находящиеся на горизонтальной или слабо наклонной поверхности имеют, как правило, правильную конусообразную или чашеобразную форму с симметричными стенками. Чашеобразные воронки с плоским, часто заболоченным дном встречаются на террасах рек и на водоразделах, с неглубоким залеганием подземных вод или мощным покровом четвертичных образований. Конусообразные воронки, развитые на склонах, часто асимметричные с неровными стенками. Высокая и пологая стенка обычно обращена в сторону тальвега долины.

Дно и стенки воронок, особенно в областях покрытого карста, обычно покрыты элювиально-делювиальными образованиями, а также могут быть задернованы и покрыты растительностью.

На дне воронок и других понижений встречаются **поноры** – вертикальные или наклонные глубокие отверстия (на поверхности диаметр отверстий до 0,5-1,0м) щеле- или колодцеобразной формы, поглощающие поверхностные воды и отводящие их в глубину карстового массива. Поноры могут быть обнаженные или скрытые под водопроницаемыми отложениями. По морфологии различают: поноры-щели или щелевидные, цилиндрические или колодцеобразные и воронкообразные. Поперечник колодцеобразных и воронкообразных обычно не превышает 0,6-1,0м.

По происхождению воронки разделяются на **воронки поверхностного выщелачивания** (или коррозионные), образующиеся за счёт выноса в растворённом состоянии выщелоченной на поверхности породы через поноры или трещины; **провальные воронки** (или гравитационные), образующиеся за счёт обвалов сводов подземных карстовых полостей, возникших за счет выщелачивания карстующихся пород на глубине и выноса вещества в растворенном состоянии; **воронки просасывания** (или коррозионно-суффозионные), образующиеся путем вмывания и проседания рыхлых покровных отложений в колодцы и полости карстующегося цоколя, выноса частиц в подземные каналы и удаление через них во взмученном и взвешенном состоянии (рисунок 9).

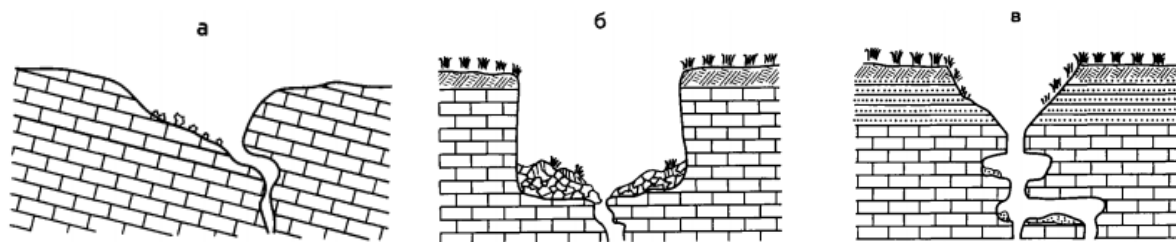


Рисунок 9 - Основные генетические типы карстовых воронок [4].

Условные обозначения: а – воронка поверхностного выщелачивания, б – провальная воронка, в – воронка просасывания.

В основу классификации воронок положено два признака: характер деформации 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 развиваются медленно, обычно от блюдцеобразных до конусообразных асимметричных форм с поглощающим понором на дне. В случае закупорки понора начинается регрессивное развитие воронки - превращение ее в озеро, заболачивание, заполнение делювием.

Провальные воронки образуются путем обрушения сводов полостей, возникающих в карстующихся породах или перекрывающих их рыхлых отложениях. При наличии в кровле полости крепких пород (песчаников, мергелей и др.) провал длительное время сохраняет крутые отвесные стенки. Если покровные отложения представлены рыхлыми грунтами, провал быстро эволюционирует от колодцеобразной формы к чашеобразной воронке.

Коррозионно-суффозионные воронки являются следствием суффозии и последующего проседания рыхлых отложений небольшой мощности в трещины или полости в кровле карстующихся пород. Воронки просасывания имеют наиболее правильную коническую форму, поскольку их склоны формируются в рыхлых отложениях. Эта форма осложняется, если поглощение смываемого со склонов материала идет не в одном отверстии понора, а в линейных или крестообразных трещинных понорах, а также при наличии открывающихся в воронку эрозионных рытвин. Вследствие

закупоривания понора или трещин в карстующихся породах вынос материала либо прекращается, либо становится незначительным и на дне воронки происходит аккумуляция рыхлого материала.

Комбинация более крупной эрозионной формы с воронкой просасывания дает *слепую балку* или *слепой овраг*.

Генетически близки к воронкам поверхностного выщелачивания коррозионно-эрозионные воронки, возникающие из поноров на дне карстовых оврагах, логов или польев. Имеют неправильную форму и характеризуются различным наклоном и высотой стенок, размывтых временными потоками. В периоды высоких половодий обычно заполняются водой. При подмывании отложений, выполняющих карстовую воронку водами, стекающими в понор, иногда наблюдаются оползневые (и обвальные) явления. Более редким типом являются воронки, образованные действием восходящих источников (Н.А. Гвоздецкий, 1954), или по Г.А. Максимовичу (1963г) - коррозионные воронки восходящих источников.

Воронки располагаются как по одной, так и группами, неравномерно по поверхности земли или совпадая с ориентировкой тектонических нарушений. Число воронок, как их размеры, на том или ином участке местности определяют интенсивность закарстованности территории. Плотность карстовых воронок (количество карстовых воронок на 1 км²) зависит от многих факторов: состава карстующихся пород, характера и мощности покровных отложений, тектоники и трещиноватости, стадии развития карста, размера воронок, климата, рельефа и т.д.

Участки площадью обычно не более 2 км², покрытые воронками называются **карстовыми полями**. 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, или беспорядочными, характеризующиеся меньшим размерами и отсутствием единой ориентировки.

Карстовые поля характеризуются следующими показателями: плотностью (количество воронок, приходящееся на 1 км²), коэффициентом площадной закарстованности (отношение суммы площадей воронок к площади поля, %), коэффициентом карстовой денудации (объемный коэффициент поверхностной закарстованности) или показателем условного среднего снижения поверхности за счет возникновения воронок (отношение суммарного объема воронок к площади поля, выраженное в мм или см). При оценке устойчивости закарстованных территорий используют показатель, обозначающий количество провалов, образующихся на 1 км² в год.

За счёт слияния нескольких воронок образуются более крупные карстовые формы – **котловины**. Это замкнутые понижения с поперечником от 100-200м до 1-3км и глубиной более 5-10м коррозионного, эрозионного-коррозионного, провального происхождения. Крупные котловины поверхностного выщелачивания могут образовываться за счет корродирующего действия талых вод снежных и фирновых пятен.

Котловины характеризуются значительными горизонтальными размерами и имеют, как правило, вытянутую или сложную форму. Склоны и дно котловин осложнены воронками и понорами, в некоторых из них поглощаются реки или временные потоки.

Карстовые депрессии — понижения с поперечником от 1-3 до 10 км - отличаются от котловин тем, что в их формировании большую роль играют эрозионные процессы и по генезису они чаще всего являются эрозионно-карстовыми. Они характерны для гипсово-ангидритового карста. На дне некоторых из них выходят карстовые родники, располагаются карстовые озера.

Ещё более масштабными поверхностными карстовыми формами являются **поля** – обширные, иногда громадные формы (до сотен км²) с плоским дном и крутыми склонами. Глубина полей может достигать уровня грунтовых вод, из-за чего на их дне образуются временные или постоянные водоёмы, карстовые озёра.

Поля по своему происхождению разделяются на 1) образовавшиеся путем слияния группы смежных воронок и котловин при их росте в

горизонтальном направлении (характерны не только для карбонатного, но и для гипсового карста), 2) тектонически-коррозионные и тектонически коррозионно-эрозионные; 3) возникшие путем подземного механического выноса нерастворимой породы, залегающей среди карстующихся известняков или на контакте с ними; 4) провальные.

В пределах карстовых воронок, котловин, депрессий, полей, особенно в зонах тектонических нарушений и литологических контактов, при их заполнении поверхностными и подземными карстовыми водами образуются карстовые и тектоно-карстовые озера. Карстовые озера могут быть подразделены на приуроченные к областям поглощения, подземного стока разгрузки карстовых вод. Кроме того, бассейны и склоны карстовых вод подразделяются на платформенные, гидрогеологических массивов и складчатых областей (таблица 12).

Следует отметить, что при изучении карстовых озер необходимо учитывать следующие факторы [14]:

1. Приуроченность озерной котловины к определённой области движения карстовых вод.
2. Степень участия карстовых вод в питании озера.
3. Гидродинамические свойства карстовых вод, питающих озеро (ненапорные, напорные).

Таблица 12

Генетическая классификация карстовых и тектоно-карстовых озер
(по Г.А. Максимовичу и К.А. Горбуновой, 1967)

Области бассейнов (и склонов) карстовых вод	Генетические типы котловин озер		Гидродинамические зоны	Воды, питающие озеро	Основные литологические типы карста	Осадочный чехол платформ на равнинах		Горные районы складчатых областей	
	Коррозийные	Воронки и котловины				Озера	Режим озер	Озера	Режим озер
Поглощения	Коррозийные	Воронки и котловины	Верхняя часть зоны вертикальной нисходящей циркуляции	Поверхностные	Карбонатный гипсовый, соляной	Кольматационные	Бессточные, эпизодически исчезающие	Высокогорные кольматационные	Бессточные, часто временные, возникающие только после таяния снега
Подземного стока	Провальные	Воронки и котловины	Горизонтальной и ненапорной и циркуляции	Карстовые ненапорные, реже напорные; в меньшей степени - поверхностные	Карбонатный гипсовый, соляной	Провальные	Бессточные, реже сточные	Озера полей	Бессточные и сточные постоянные и появляющиеся периодически
	Тектоно-карстовые	Поля							
Разгрузки (дренажа)	Коррозийные и провальные	Воронки восходящих карстовых источников	Вертикальной восходящей и сифонной циркуляции	Карстовые напорные восходящие	Карбонатный гипсовый, реже соляной	Ключевые, часто в долинах	Сточные	Долинные и предгорные ключевые озера	Постоянный сток

Карстовые долины возникают в результате преобразования речной или овражной долины. Основными факторами образования карстовых долин являются коррозионное расширение поглощающих поноров в их днищах и утрата активного руслового стока.

Карстовые останцы характерны в основном для весьма зрелых стадий развития карста. Подразделяются на останцы тропических областей; древние останцы полей, равнин, горных районов, сохранившиеся на поверхности вне тропических областей и древние погребенные останцы. Они достаточно многочисленны и разнообразны в быстро развивающемся соляном карсте. В карбонатном же карсте развиты преимущественно в тропических областях, где формируются высокие и крутосклонные останцы в виде столбов, конусов, плосковерхих башен и более мелкие конусообразные и куполовидные формы (рисунок 10). Оголенные склоны останцов осложнены желобковыми каррами, на отвесных скалах отмечаются стенные карры. Большую роль в формировании карстовых останцов играет обваливание известняка по трещинам и подтачивание останцов снизу поверхностными или грунтовыми водами. В основании останцов возникают развивающиеся в горизонтальном направлении коррозионные ниши, и происходит накопление на базисной поверхности водоупорных остаточных глин.

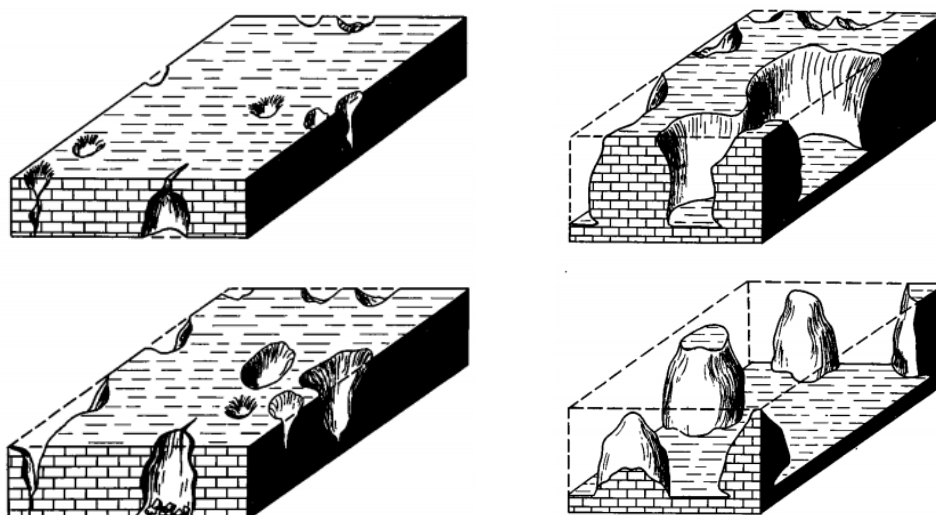


Рисунок 10 - Схема образования останцов тропического карста [4].

К *переходным* от поверхностных форм к подземным относят, наряду с упомянутыми выше каррами, карстовые колодцы и шахты. **Карстовые колодцы** - это вертикальные или крутонаклонные каналы (полости) с поперечником в верхней части от 1-3 до 5 м и глубиной до 20 м; к **шахтам** относят полости глубже 20 м, достигающие нескольких десятков, иногда и сотен метров.

Полости колодцев и шахт могут быть обязаны своим возникновением гравитационным (провальными) процессам, либо выщелачиванию водой карстующейся породы по трещинам, при этом корродирующее действие могут оказывать талые снеговые воды, нисходящие водные потоки и напорные воды вертикальной восходящей циркуляции. Преобладают колодцы и шахты, связанные с зоной вертикальной нисходящей циркуляции карстовых вод.

К **карстовым пропастям** относят комбинации естественных шахт с горизонтальными и наклонными пещерными ходами. Глубина карстовых пропастей может достигать 2 км.

3.2. Подземные карстовые формы

Типичными *подземными формами* являются **карстовые пещеры**. Большинство пещер образуется при ведущей роли выщелачивания горных пород, часто при совместном действии растворения и размыва водными потоками и обрушений. Особенно значительна роль обрушений породы на зрелых стадиях разработки пещерных полостей. Некоторые пещеры возникли под действием термальных и минеральных вод.

Подземные полости образуются в зонах вертикальной нисходящей (в зоне аэрации), горизонтальной и сифонной циркуляции карстовых вод. Наиболее крупные карстовые пещеры возникают в основном при полном заполнении пещерных каналов подземными водами, в зоне полного насыщения, и циркуляции воды под гидростатическим давлением. Различают ряд стадий их развития, относящихся к эпохам полного и частичного заполнения водой – напорной эпохе и безнапорной [13].

Поднятие территории, колебание базиса коррозии нередко приводит к появлению пещер в несколько этажей. Для таких пещер характерны причудливые очертания, что обусловлено сложностью систем трещин, определяющих направление фильтрации растворяющих вод, их пересечением и неоднородностью состава карстующихся пород.

В таблице 13 приводится схема развития многоэтажной пещеры при наличии транзитной реки (по Максимовичу) [13].

Пещеры весьма разнообразны по морфологии и размерам. Небольшие, слепо оканчивающиеся пещеры из одного или небольшого числа гротов (залов) называют мешкообразными. «Коридорами» называют пещеры, состоящие из коридора с несколькими небольшими расширениями в виде гротов. В морфологии пещерных полостей большая роль принадлежит трещиноватости карстующихся пород и натечно-капельным образованиям. При разработке пещерных тоннелей по вертикальным и круто наклонным трещинам они отличаются прямолинейностью, резкими «коленчатыми» изгибами. Нередко тоннели пересекаются, образуя сложные решетчатые лабиринты.

Наиболее крупной среди известных является Мамонтова пещера в Северной Америке, составляет 341 км суммарной длины. Высота одного из залов достигает 40м при размере в плане 163x87м. Самая грандиозная по длине гипсовая пещера в мире - открытая в 1966 году пещера Оптимистическая в Украине. Суммарная длина её закартографированных ходов составляет около 232 км, а общая площадь пещеры около 2 гектар, что обусловлено многочисленностью и извилистостью ходов, залегающих на глубине ~ 20 м. Самой высокой пещерой является Анакопийская пропасть в Новом Афоне (Кавказ). Один из ее залов имеет высоту более 70м. В Предуралье длина Кунгурской пещеры составляет 4600м, а на дне ее располагается более 30 озер, самое крупное из которых имеет площадь 200м² и глубину до 6 м. Из ледяных пещер наибольшей известностью пользуется Кунгурская ледяная пещера в Пермской области (Сев. Урал). Длина ходов пещеры составляет 5,6 км.

Обобщенная схема развития пещер для русского и средневропейского типов карста при наличии транзитной реки (по Г.А.Максимовичу, 1946, 1962)

Циклы эрозии	Явления, характеризующие стадии			Преобладающие процессы для подземного карста
	Стадии развития подземного карста	Подземные	На поверхности	
III	VII Двухъярусная	Выход на дневную поверхность карстового потока второго (нижнего) этажа пещеры. Постепенный уход карстовых вод по трещинам вглубь. Озера в углублениях и т.д. Химическая аккумуляция (сталактиты и сталагмиты) и механическая аккумуляция (каменные обвалы и земляные осыпи) во втором этаже. В зависимости от прочности пород высоты эрозионных этажей, соединение этаже пещер за счет провалов кровли второго этажа или уничтожения первого этажа обвалами. Цементация или обрушение сводов первого этажа. Переход в трехъярусную пещеру и т.д.	Почти полное уничтожение смывом чехла покровных некарстующихся образований. Увеличение числа сдвоенных и сложных воронок выщелачивания. Рост числа провалных воронок. Вскрытие на отдельных участках первого этажа пещер. Боковая эрозия транзитной реки уничтожает часть карстового поля и находящиеся ниже пещеры.	
II	VI Обвальнo-цементационная	Возобновление глубоинной эрозии, переход к III циклу		
	V Натечно-осыпная	Рост подземных обвалов. Увеличение системы подземных пустот. Местами вскрытие каналов текущего ниже потока за счет провалов пола пещер.	Рост числа воронок и трещиноватости. Массовые провалы – вскрытие пещер. Могут образоваться карстовые окна, тоннели, мосты, арки.	Подземная аккумуляция
	IV Воклюзoвая	Исчезновение реки в пещере. Карстовый поток находится на более низком уровне в трещинах и щелевидных пустотах. Вода задерживается в заглиненных углублениях или на уровне потока карстовых вод в виде подземных озер. Просачивающиеся воды обуславливают образование сталактитов и колонн. Рост обвалов и каменных осыпей. Образование земляных конусов под органичными трубами. Смешанные каменно-земляные осыпи.	Значительное увеличение числа провалных воронок. Образование карстовых полей. Сложные воронки – сдвоенные, строенные. Заполнение их делювием. Блюдцеобразные воронки. Озера в воронках.	
		Выход на дневную поверхность устья карстового потока в виде воклюзского источника. Увеличение обвалов кровли	Рост числа коррозионных воронок. Возможно образование провалных	

		и стен каналов карстовой реки. Образование органических труб, рост гротов. Постепенное углубление подземного потока вниз по трещинам.	воронок. Уменьшение толщи покровных отложений за счет смыва и уноса в пещеру по карстовым пустотам.	
Возобновление глубинной эрозии, переход ко II циклу				
I	III Каналовая	Расширение щелевидных пустот в каналы шириной более 1 м (размер зависит от мощности потока и растворимости пород). Начало расширения каналов обвалами в кровле и с боков, образование гротов и проходов.	Рост числа коррозийных воронок, приобретающих коническую форму.	
	III Щелевая	Расширение подземных трещин пленочными молекулярными водами в щелевидные пустоты. Обособление двух зон циркуляции карстовых вод. Зона вертикальной нисходящей циркуляции характеризуется плоскими эпизодическими потоками по щелевидным пустотам. По небольшим трещинам продолжается нисходящее движение. Зона горизонтально циркуляции характеризуется расширением трещин до щелевидных пустот, размером от 5-15 до 30-40 см. Щелевидные пустоты приобретают остро-волнистые, а затем округлые контуры. Большая часть горизонтально движущихся вод канализируется из трещин в щелевидные пустоты.	Пленочные молекулярные воды расширяют старые трещины. Образуются новые трещины. Под покровными отложениями на пересечении трещин в карстовый тоще формируются отдельные плоские блюдцеобразные воронки.	Образование скульптурных форм
	I Трещинная	Перемещение пленочных, молекулярных и капиллярных под вниз по трещинам. Формирование горизонтального трещинного потока, стекающего в поддолинные (подрусловые) пустоты или аллювий дренирующей реки. Расширение трещин растворением и механическим действием воды	Образование новых трещин. Просачивание пленочных молекулярных и капиллярных вод вглубь по трещинам. Увеличение трещин растворением и механическим разрушением.	
	Образование расчлененного рельефа глубинной эрозией		Поверхностный водонепроницаемый покров, предохраняющий карстовые породы от проникновения воды, нарушен в оврагах	

Примечание к таблице: «Воклюз» - карстовый источник, обладающий большим дебитом и непрекращающимся стоком в периоды маловодья. Описан впервые во Франции в р-не Воклюз.

4. Карстовые отложения

К карстовым отложениям относятся разнообразные по составу и генезису породы, объединяемые лишь общностью приуроченности к карстовым полостям. В зависимости от происхождения подразделяются на *остаточные, гравитационные, гидромеханические, гидрохемогенные, биогенные и биохемогенные, антропогенные образования*, а также *криогенные отложения - лёд* (таблица 14).

Остаточные отложения формируются за счет накопления и переотложения нерастворимого остатка карстующихся пород. Характерными отложениями является *терра-росса* (от итал. *terra rossa* – красная земля) – красноцветные глинистые отложения, обогащённые гидроокислами алюминия и железа, представляющие собой нерастворимый остаток известняков. *Терра-росса* встречается как на дне карстовых воронок, так и в пещерах.

Элювиальные продукты, обычно смешанные с той или иной долей привнесенного с поверхности делювиального материала, образуют накопления пещерной глины.

Продуктом избирательного выщелачивания доломитов и доломитовых (или доломитизированных) известняков является доломитовая мука – рыхлая масса, имеющая вид муки или песка и состоящая из кристаллов (часто корродированных) и агрегатов доломита, залегающих в виде гнезд, карманов, неправильной и линзообразной формы тел в приповерхностной зоне карстующихся доломитовых пород. При коррозии последних происходит вынос более растворимого кальцита и, соответственно, накопление нерастворенного доломита.

Гидромеханические (водные механические, инфлювиальные) отложения связаны с приносом водой в карстовые полости и трещины карстового массива твёрдых частиц. Для группы таких отложений, выполняющих трещины, иногда применяется специальный термин «*кольматолиты*» (от франц. *colmatage* – вмывание).

Таблица 14

Генетическая классификация отложений карстовых пещер
(по материалам Д.С.Соколова, 1959 и Г.А. Максимовича, 1960)

Пещерные отложения	Автохтонные	Аллохтонные
1. Остаточные отложения: элювиальная или пещерная глина	+	-
2. Обвальные отложения: глыбы и другие обломочные продукты обрушения сводов пещер	+	-
3. Водные механические осадки: а) отложения пещерных рек; б) отложения пещерных озер; в) отложения, принесенные в пещеру сверху через трещины, карстовые воронки, колодцы, шахты	- + -	+ - +
4. Водные хемогенные отложения: а) натечные образования: сталактиты, сталагмиты, колонны, покровные на стенах и полу пещер и т.д.; б) кальцитовые образования на выступах дна, оторочки на сталагмитах, пленки, оолиты, пизолиты, конкреции, плотины озер и др. в) кристаллы автохтонных минералов: кальцита, арагонита (в карбонатных отложениях), гипса (в гипсовых и реже карбонатных отложениях), галита (в соли)	+ + +	+ + -
5. Пещерный лед: а) атмосферный (снег, кристаллы); б) гидрогенные: сталактиты, сталагмиты, колонны, покровный на полу, лед озер; в) гетерогенный: кора обледенения, покровный лед на полу	+ + +	+ - +
6. Органогенные отложения: гуано, скопления костей, костяная брекчия, фосфориты, фосфоритовые земли и другие.	+	-
7. Гидротермальные и другие аллохтонные отложения: сульфиды (пирит, марказит, галенит, сфалерит), барит и др.	-	+
8. Антропогенные отложения культурного слоя пещер	-	+

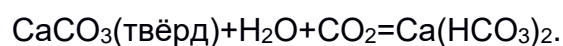
Представлены такие образования преимущественно скоплениями вязкой глины. У основания каналов, по которым происходит вертикальное нисходящее стекание вод, можно наблюдать «земляные» конусы, сложенные такими алевроитово-глинистыми осадками.

В некоторых пещерах накапливаются осадки, связанные с деятельностью подземных рек. При этом значительная часть отлагаемого ими материала может быть связана в привносом частиц водным потоком из-за пределов собственно карстовых полостей. Из общего комплекса карстовых отложений они выделяются, если скорость движения потока достаточна высока, чтобы придать отложениям характерные структурно-текстурные особенности. Невысокие скорости движения подземных вод приводят к формированию глинистых отложений.

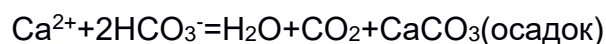
Отложения подземных озёр представлены различными осадками, источниками которых являются продукты выветривания коренных пород, минералы, кристаллизующиеся из озерной воды, а также материал, занесенный водными потоками (в том числе и подземными реками).

Гидрохемогенные (или водные химические) отложения - различные образования, формирующиеся за счёт процессов химического осаждения вещества из водных растворов.

Особенно широкое развитие в пещерах имеют карбонатные натёчные образования. Воды, обогащенные углекислым газом, просачиваясь по трещинам в карбонатных породах, насыщаются кальцием в виде бикарбоната:



Когда насыщенная бикарбонатом кальция вода просачивается с потолка или стенок пещеры, она теряет часть углекислого газа; в результате нарушения равновесия реакция сдвигается влево. Бикарбонат переходит в карбонат кальция (CaCO_3), который частично выпадает в осадок ещё в момент, когда вода находится на потолке пещеры:



Так из капель, просачивающихся с потолка пещеры, нарастают вниз натёчные образования, называемые сталактитами, а из капель, падающих на пол пещеры, образуются сталагмиты.

Форма этих образований весьма разнообразна (рисунок 11), но при этом закономерна. При осевом питании возникают трубчатые сталактиты (макаронны), характеризующиеся постоянным диаметром канала и структурой, контролируемой геометрическим отбором при росте на мениске капли. При комбинированном площадном питании – стоке раствора по поверхности и поступлении по осевому каналу – возникают конические сталактиты. При линейном питании образуются драпировки, а при слиянии линейно расположенных сталактитов возникают занавеси. Сталактиты, растущие в условиях высокого пересыщения, состоящие из известкового туфа, и тем самым лишенные структуры, задаваемой геометрическим отбором, называют туфлактиты.



Натечные образования в пещере
Мраморная. Крым



Натечные образования на острове
Пхукет, Адаманское море

Рисунок 11 – Примеры натечных образований в подземных и
поверхностных карстовых формах

Начало роста сталагмита связано с возникновением локальной сферолитовой корки (известной у исследователей пещер как «яичница»); при дальнейшем росте вступает в силу геометрический отбор (вплоть до формирования монокристаллических обелисковых сталагмитов). При площадном питании возникают сталагмитовые коры (наиболее часто - туфлагмитовые коры, рост в которых не определяется геометрическим отбором). В некоторых случаях образуются ониксовые сферолитовые покровные коры [24].

Корочки кальцита часто образуются при испарении пленочных растворов на пористых поверхностях. Выше уровня текущей или стоячей воды в условиях высокой увлажненности из неподвижных водных плёнок при испарении воды или удалении углекислого газа осаждаются агрегаты кристаллов и кристаллических дендритов (кристаллититы) или сфероидолитовых дендритов (кораллиты), формируя кристаллититовые (или кораллитовые) корки. Характерной особенностью строения таких корок является построенность из кораллоподобных агрегатов, не образующих сплошных сростаний. Объясняется это тем, что при сближении растущих индивидов резко замедляется испарение капиллярной пленки вследствие того, что оторвавшись от одной поверхности, молекулы H_2O либо CO_2 тотчас попадают на другую. Поэтому рост кристаллов прекращается до их соприкосновения.

Кальцитовые пленки могут образовываться и на поверхности вод подземных озер, насыщенных гидрокарбонатом. Кристаллизовавшиеся из водного раствора тончайшие кристаллики кальцита (менее 0,1 мм) свободно плавают на поверхности вод, срастаясь друг с другом, формируют сначала тоненькую пленку, плавающую на поверхности воды в виде отдельных пятен, а затем и сплошную пленку кальцита, покрывающую все озеро, подобно ледяному покрову. Такие пленки имеют преимущественно сезонный характер: они возникают в сухие периоды, когда в озерной воде наблюдается максимальная концентрация ионов кальция и гидрокарбоната, с поступлением новых вод пленки исчезают.

Среди специфичных хемогенных образований пещер нужно отметить геликтиты (от греч. *helictós* - извивающийся) – кальцитовые или арагонитовые агрегаты в виде причудливо изгибающихся цилиндрических и конических веточек, ветвящихся пушистых конусов, сложной спирали, и т.д., направление роста которых не зависит от направления действия силы тяжести. Внутри геликтита располагается тонкий осевой капилляр, через который осуществляется поступление питающего раствора к растущему кончику агрегата. Геликтиты встречаются в слабообводненных участках пещер и располагаются группами, протягивающимися вдоль трещин породы.

В случае фильтрации вод через толщи, содержащие рудные залежи или рассеянную минерализацию, из них может осаждаться не только кальцит и арагонит, но и другие минеральные соединения. Например, при фильтрации вод через пиритсодержащие породы, образуются сульфатные растворы, отлагающие гипс, барит, целестин, эпсомит и др. При фильтрации с окисляющимися полиметаллические рудные тела – азурит, малахит, церуссит и др.

При общем снижении обводненности пещеры в процессе ее эволюции на одной и той же стадии наблюдаются в разных частях пещерной полости неодинаковые притоки воды, отчего появляются различные формы натечно-капельных образований.

Следует отметить, что зоны карбонатного минералообразования, обладающие эффективным рН-буферизирующим потенциалом ($\text{CaCO}_3 + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^-$) выступают важным геохимическим барьером на пути миграции водных растворов, содержащих металлы (поступающие из окисляемых рудных ассоциаций, при техногенном загрязнении и пр.). На поверхности кристаллизовавшегося кальцита можно наблюдать сульфатные и карбонатные микроминеральные фазы (рисунок 12); часть ионов металлов способна сорбироваться на поверхности карбоната кальция ($>\text{CO}_3\text{H}^0 + \text{Me}^{2+}(\text{aq}) = >\text{CO}_3\text{Me}^+ + \text{H}^+(\text{aq})$).

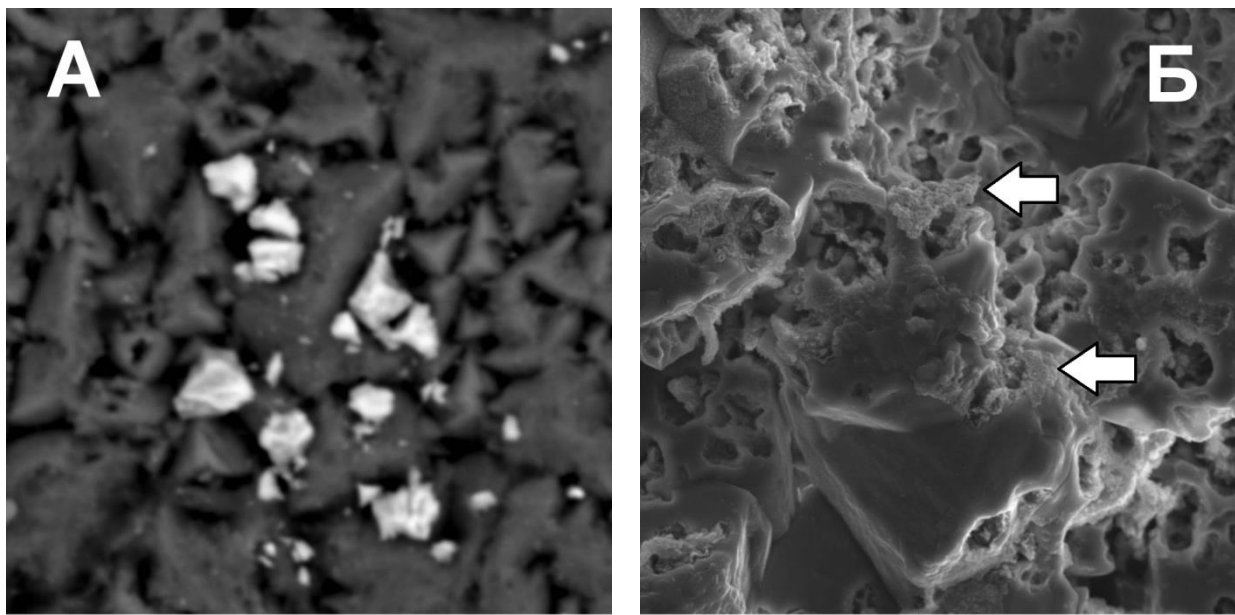


Рисунок 12 – Микроминералы цинка (А) и серебра (Б) на поверхности кальцитовых натечных образований [20]

Наряду с хемогенными образованиями, для многих пещер характерны и биохемогенные накопления. Значительные объёмы органогенного материала в пещерах представлены разложившимся помётом летучих мышей – *гуано*. В типичном гуано содержится ~9% азота и ~12% фосфорной кислоты, что делает его ценным азотно-фосфатным удобрением.

В пещерах присутствуют также гравитационные обвальные накопления – продукты обрушения сводов пещер. В сводах крупных галерей можно наблюдать купола обрушения, под которыми расположены высокие конусы из обломков. Вследствие площадного выщелачивания возможна просадка пластов на значительных площадях с образованием коррозионно-гравитационных брекчиевых полостей, внешне сходных с тектоническими или седиментационными образованиями.

Обвалы часты близ входов пещер. Причиной тому интенсивное температурное и морозное выветривание при сезонной или суточной смене положительных и отрицательных температур. Обвальный процесс в зоне морозного выветривания особенно интенсивен, при этом большинство обвалов здесь происходит, когда промерзшие породы оттаивают.

Среди криогенных отложений особое место занимают разные по форме и строению ледяные образования (ледяные кристаллы, сталактиты, сталагмиты, колонны, кора обледенения, покровный лед и озерный лед), возникающие в подземных полостях и пещерах. По генезису различают лед натечный, капельно-натечный, снежный, снежно-водяной, сублимационный. Пещерный лед образуется в статических пещерах при затекании холодного воздуха в зимний период, а в динамических пещерах - при охлаждении быстро движущегося воздуха в сужениях. Г.А. Максимович (1947) выделяет следующие типы пещерного льда: атмогенный, гидрогенный и гетерогенный (смешанный); и классы: I - пресный (до 0,1% растворенных веществ) лед и II - солоноватый (0,1-1% растворенных веществ) лед.

5. Карстовые месторождения

Карстовые месторождения образуются при заполнении карстовых полостей рудным веществом. При этом рудное вещество может быть связано с карстом как генетически, так и лишь пространственно. Согласно одной из обсуждаемых моделей [10], в зависимости от агентов рудообразования, механизма рудоотложения и происхождения карстовых полостей среди месторождений можно выделить несколько групп (рисунок 13)⁵. При образовании месторождений первой группы (рисунок 13, а, б) поступление в карстовые полости рудного материала происходит инфлюационным путем в виде механических примесей. Для месторождений второй группы характерно инфильтрационное рудоотложение (рисунок 13, в, г), третьей – гидротермальное (рисунок 13, д, е).

Известны карстовые месторождения бокситов, никелевых руд, фосфоритов, железа, марганца, свинца, цинка, сурьмы, флюорита, ртути, каолинов, золота, алмазов и др. Карстовые месторождения обычно имеют небольшие запасы, но характеризуются высоким качеством руд.

⁵ Обоснование приводимой модели, примеры и описания месторождений приведены в работе [10] (Прим. авторов).

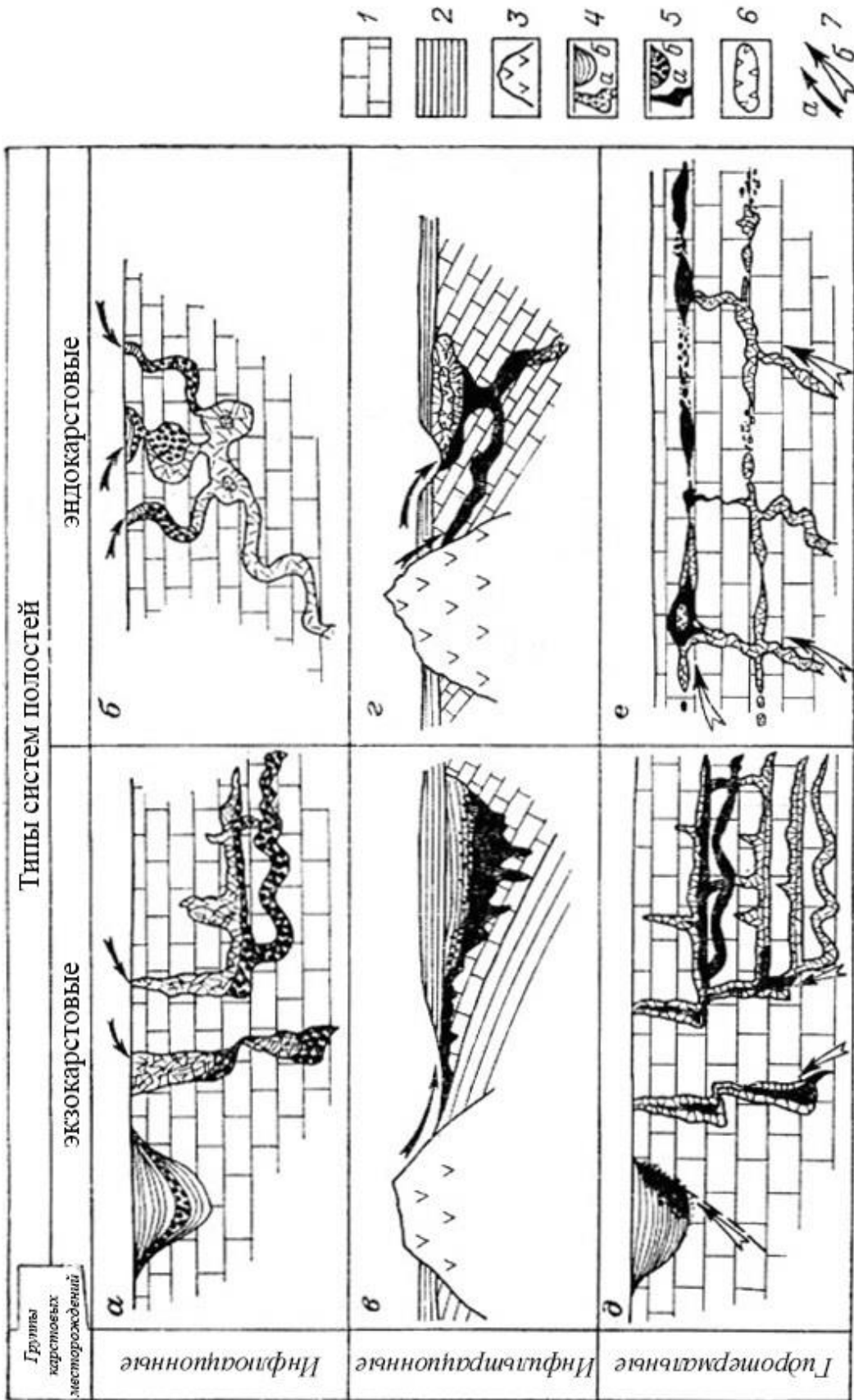


Рисунок 13 – Генетическая классификация карстовых месторождений [10]

Условные обозначения: породы: 1 – карстующиеся, 2 – терригенные, 3 – ультраосновные; карстовые полости: 4 – с нерудным заполнителем, 5 – с рудным веществом (а – массивным, б – прожилково-вкрапленным); 6 – жероды; 7 – рудоотлагающие поверхностные воды (а) и термальные растворы (б).

Задания для самоконтроля

1. Установите категорию устойчивости относительно средних диаметров карстовых провалов трех, выделенных на схеме Долгоруковского карстового массива (Крым), участков площадью 1 км² (см. на следующей странице).

Условные обозначения к схеме Долгоруковского карстового массива: 1 - структурно-денудационный склон Долгоруковского массива; 2 - структурно-тектонические уступы; 3 - денудационные уступы; 4 - водораздельные пространства; 5 - коррозионно-денудационные приводораздельные склоны; 6 - а) коррозионно-эрозионные склоны, б) днища постоянных и временных водотоков; 7 - эрозионные уступы; 8 - коррозионные склоны карстовых воронок и котловин; 9 - эрозионно-коррозионные: а) днища, б) склоны карстовых долин; 10 - входы в карстовые полости: а) шахта-понор, б) вскрытая пещера, в) пещера источник, г) нивально-коррозионная полость; 11 - подземные ходы и залы карстовых полостей (проекция на поверхность); 12 - аккумулятивные песчано-глинистые отложения днищ карстовых форм; 13 - остаточные отложения в карстовых воронках и котловинах (а), в днищах карстовых долин (б); 14 - тектонические разрывы; 15 - направления стока поверхностных вод; 16 - направления движения подземных вод; 17 - карстовые источники; 18 - поноры: а) в заиленные трещины, б) в зияющие трещины, в) в карстовые полости. Карстовые полости: 1 - пещера Красная, 2 - шахта Голубиная, 3 - шахта Провал.

2. Назовите генетический тип карста шахты Ход Конем (Горный Крым, Чатырдаг), при котором на глубине 85-195м образовались сферические полости (диаметром 1,0м и 2,5м) заполненные красно-коричневой глиной с крупными (до 40 см) кристаллами исландского шпата, а также кальцитовые жилы с кристаллами исландского шпата. Температура гомогенизации включений в жильном кальците достигает 80 °С, в исландском шпате - до 67°С.

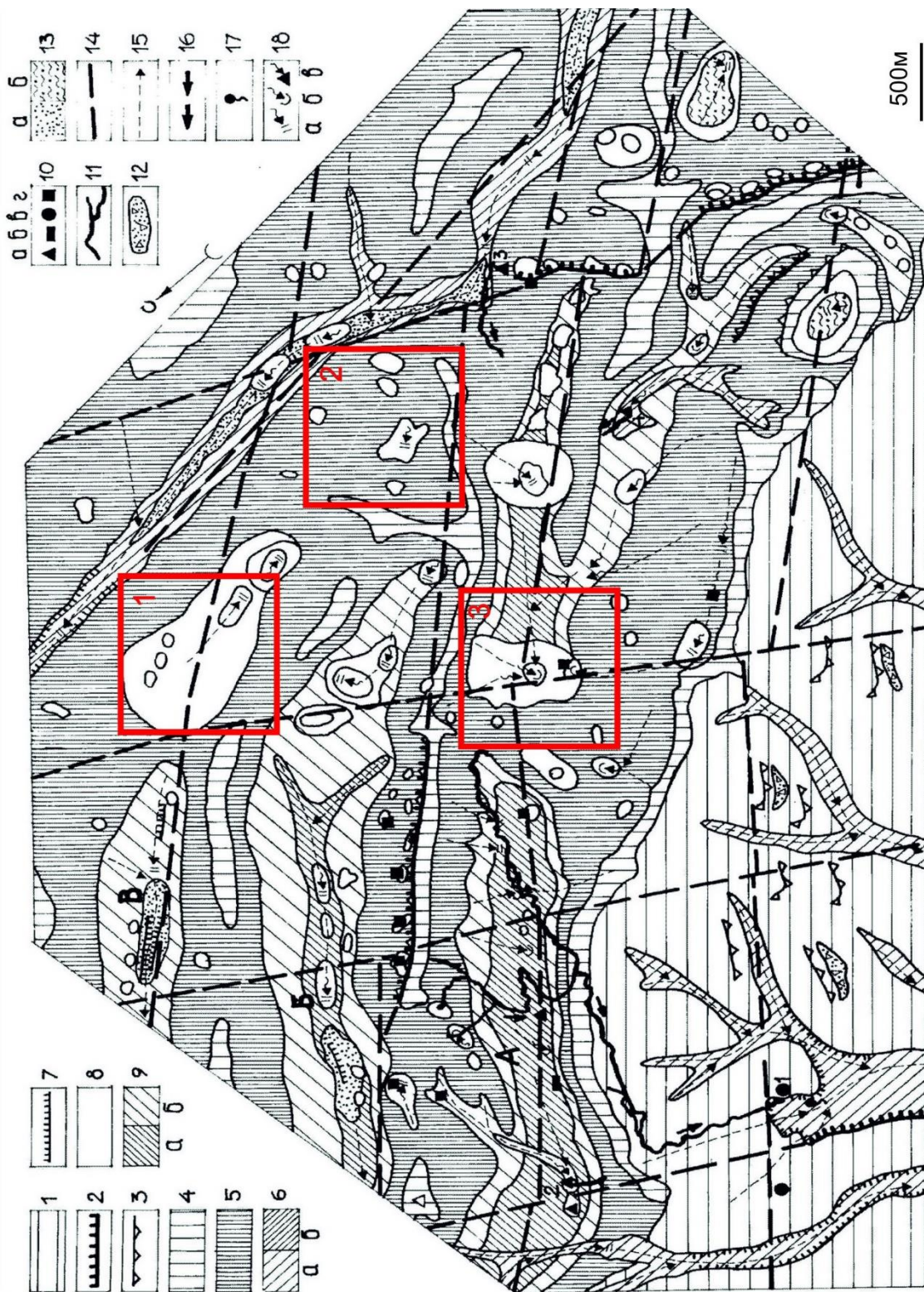
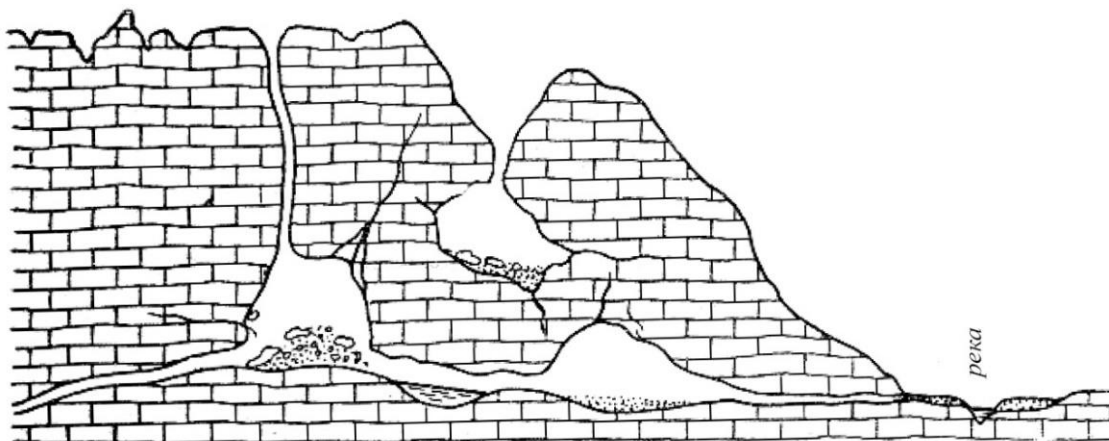
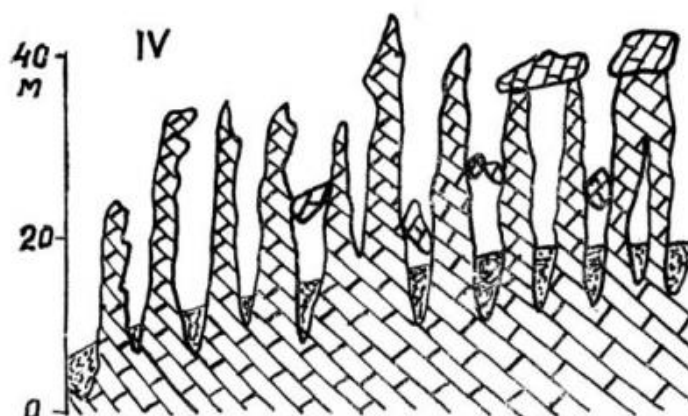
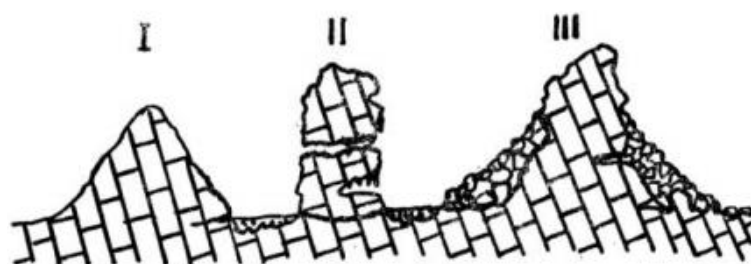


Схема Долгоруковского карстового массива (по Вахрушеву В.А.).

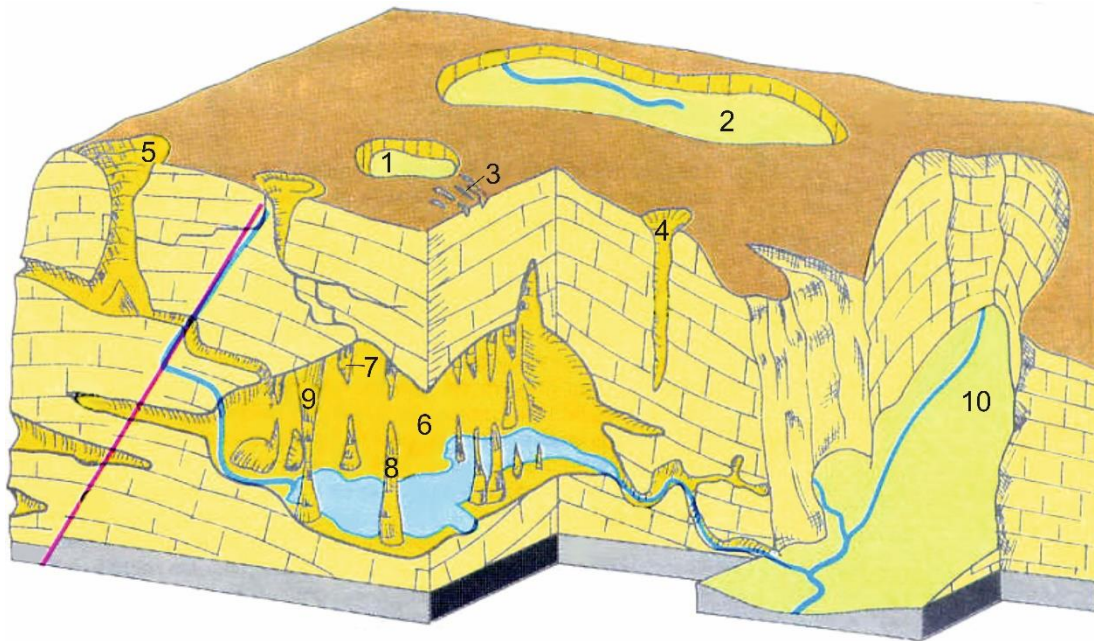
3. Укажите стадию развития пещеры согласно классификации Максимовича (таблица 13) и основные элементы карстового рельефа, изображенные на рисунке:



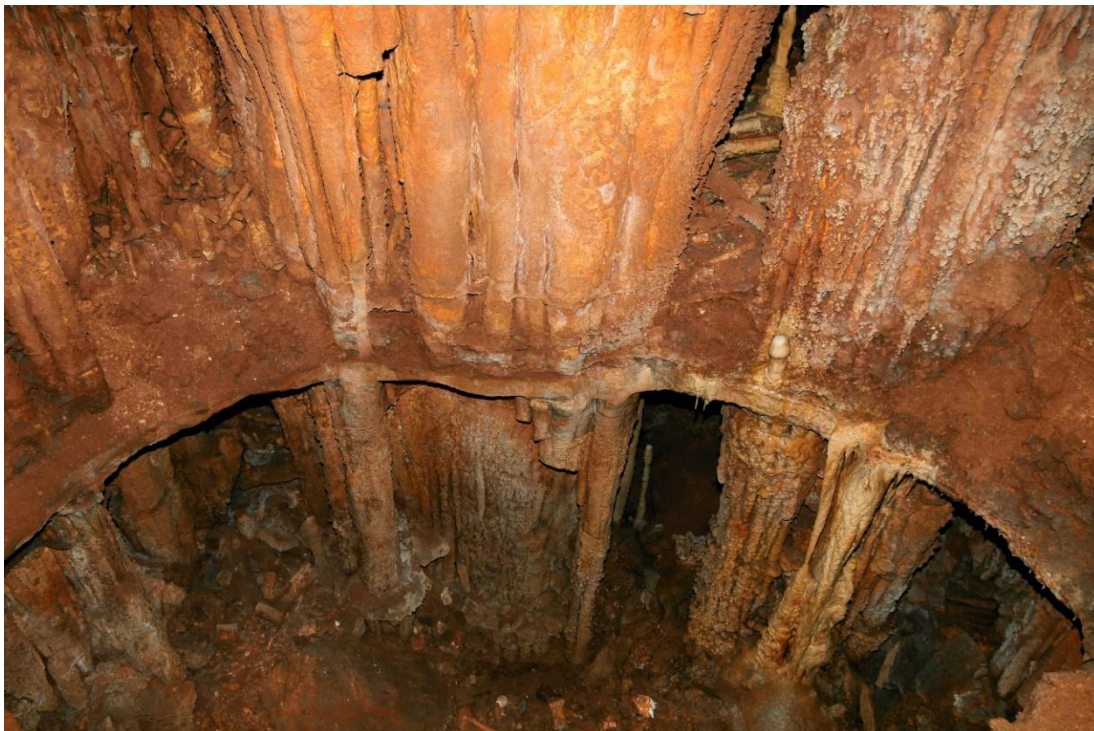
4. При каких условиях образуются карстовые формы рельефа в виде конуса (I), башен (II), конуса, покрытого осыпью (III), «каменного леса» (IV) (см. рисунок)?



5. Перечислите все карстовые формы рельефа, изображенные на рисунке.



6. Объясните условия образования карстовых отложений пещеры Мамонтова (Крым), изображенных на фотографии.



Список использованной и рекомендуемой литературы

1. Ананьев В.П., Потапов А.Д. Инженерная геология: Учеб. для строит. спец. вузов. 3-е изд., перераб. и испр. - М.: Высш. шк., 2005. 575 с.
2. Андрейчук В. Пещера Золушка. – Сосновец-Симферополь, 2007. 408с.
3. Вахрушев Б.А., Дублянский В.Н., Амеличев Г.Н. Карст Бзыбского хребта (Западный Кавказ). - М.: РУДН, 2001. 165 с.
4. Гвоздецкий Н.А. Карст. - М.: Мысль, 1981. 214с.
5. Гвоздецкий Н.А. Проблемы изучения карста и практика. - М.: Мысль, 1987. 387с
6. Гидротермокарст: Библиографический указатель за 1894-1989 гг. / Составитель Дублянский Ю.В. - Новосибирск: ИГиГ СО РАН СССР. 1990. 55 с.
7. Дублянский В.Н., Клименко В.И., Михайлов А.Н. Ведущие факторы развития карста и бальная оценка его интенсивности // Инженерная геология. - М.: Наука, 1990г. № 2. С. 52-58.
8. Закономерности формирования и моделирования гидротермокарста / Дублянский Ю.В. - Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. – 151 с.
9. Климчук А.Б., Тимохина Е.И., Амеличев Г.Н. и др. Гипогенный карст Предгорного Крыма и его геоморфологическая роль. – Симферополь: ДАИЙПИ, 2013. 204с.
10. Кутырев Э.И., Михайлов Б.М., Ляхницкий Ю.С. Карстовые месторождения. - Л.: Недра, 1989. 311с.
11. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика. - Л., Недра, 1977. 479с.
12. Мавлюдов Б.Р. Гигантские гипсовые кристаллы в пещерах Найка (Мексика) // Пещеры: сборник научных трудов / Естественнонаучный институт Перм.гос.ун-та. - Пермь, 2010. Вып.33. С. 19-33.
13. Максимович Е.А. Основы карстоведения, Том 1. - Пермь, 1963. 445с.
14. Максимович Е.А. Основы карстоведения, Том 2. - Пермь, 1969. 529с.
15. Методические указания по применению геофизических методов для исследования закарстованных участков - М: НИИТС, 1972г.

16. Печеркин А.И., Болотов Г.Б., Катаев В.Н. Изучение тектонической трещиноватости платформенных структур для карстологических целей. Учебное пособие по спецкурсу. - Пермь: Перм. ун-т, 1984. 85с
17. Попов Ю.В., Пустовит О.Е. Методика изучения и анализа трещиноватости. Часть 2. Графические методы изображения замеров ориентировки трещин и анализ трещиноватости. Учебно-методическое пособие. - Ростов-на-Дону: ЮФУ. 2009. 34 с.
18. Попов Ю.В., Пустовит О.Е. Методика изучения и анализа трещиноватости. Часть 1. Трещины и вызывающие их деформации. Методика полевого изучения трещиноватости. Учебно-методическое пособие. - Ростов-на-Дону: ЮФУ. 2009. 34 с.
19. Попов Ю.В., Цицуашвили Р.А., Попова Н.М. Микроминеральные ассоциации щелочного карбонатного геохимического барьера в горных выработках Белореченского барит-полиметаллического месторождения // Фундаментальные исследования. 2014. № 5-6. С. 1248-1252.
20. СНиП 22-01-95 Геофизика опасных природных воздействий
21. СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов.
22. СП 116.13330.2012 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения.
23. Справочник по инженерной геологии. Отв.ред. М.В. Чуринов. Изд. 3-е. - М: Недра, 1981. 325с.
24. Степанов В.И. Структуры и текстуры минеральных агрегатов, образующихся в свободном пространстве пустот // Спелеология в России, вып.1. - М., 1998. С.70-91.
25. Терминология карста / Тимофеев Д.А., Дублянский В.Н., Кикнадзе Т.З. - М. Наука, 1991. 259с.

Подписано в печать 23.11.2015.
Формат 60×841/16. Бумага офсетная, печать офсетная.
Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 2.37.
Тираж 50 экз. Заказ №4842.

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции
Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ
344090, г.Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел. (863)247-80-51.