

ТЕОРИЯ КАРСТОВЫХ ПРОЦЕССОВ.

Дегтярев Александр

Карст - плато в Словении.

карст - совокупность явлений в растворимых горных породах, связанных с образованием в них полостей. Не все подземные полости являются карстом. Не причисляются к карсту антропогенные полости.

Спелеология - занимается природными полостями.

Спелестология - искусственными заброшенными полостями.

Диггеры занимаются искусственными действующими полостями.

Не все природные полости являются карстовыми:

а). Раскрытые тектонические трещины;

б). Пустоты в лавовых потоках;

в). Полости в гидротермальных и пегматитовых жилах. И др.

Карстующимися породами являются:

- известняки (порода, целиком состоящая из минерала кальцита).

Как правило, органогенного происхождения, образуются в океанах на значительных глубинах, представляют собой известковые останки морской флоры и фауны.

- мергели (известняк с глинистой составляющей более 5%).

- меловые породы (разновидность известняка из останков планктонных водорослей).

- доломиты, доломитизированные известняки (известняк с примесью минерала доломита $\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$)

- гипсы. Порода, целиком состоящая из минерала того же названия

- гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

- ангидриты как порода состоят из минерала ангидрита (безводного гипса) CaSO_4

- соленосные толщи: поваренная соль (минерал галит NaCl), сильвин - KCl , или их смесь. Смесь галита и сильвина можно увидеть зимой, ей посыпают дороги. Галит бесцветный, сильвин розовый.

- конгломераты. Окатанная галька любого состава,

сцементированная известковым цементом с примесью песка. Растворяется известь, а галька выносится механически.

- брекчии. Отличается от конгломерата неокатанностью сцементированных обломков.
- песчаники. Сцементированный известковым цементом песок различного состава.
- вулканические туфы. Также содержат известковую составляющую, которая может легко растворяться.

Разрушение горных пород связано со следующими факторами:

1. Эрозия - механическое разрушение горных пород водными потоками. Пример: овраг. Действующий фактор - кинетическая энергия воды.
2. Коррозия - химическое растворение горных пород водой.
 - в том числе - биологическая коррозия - растворение горной породы органическими кислотами и другими продуктами жизнедеятельности. Пример: талом (тело) лишайника может растворять поверхность известняка со скоростью 1,5 мм/год.
3. Нивация (прилагательное - нивальный) - разрушение горных пород снежным покровом.
4. Гляциальные процессы - разрушение ледниками.
5. Суффозия - выщелачивание растворимых солей почвы и вымывание в глубину тончайших нерастворимых частиц горных пород токами воды. Комбинация эрозии и коррозии: материал удаляется и в растворе и во взвешенно-взмученном состоянии.
6. Гравитационные процессы. Обвалы и проч.

I. ПОВЕРХНОСТНЫЕ ФОРМЫ КАРСТОВОГО РЕЛЬЕФА

Поверхностный карст бывает голым, задернованным и покрытым (зеленым, т.е. под лесом).

ФОРМЫ: карры, воронки, котловины, карстовые рвы, карстовые долины, карстовые ложбины, поля, карстовые останцы.

КАРРЫ - микроформы, начальная стадия карстообразования. Бывают в виде голого карста и подпочвенного.

Факторы, влияющие на образование карров.

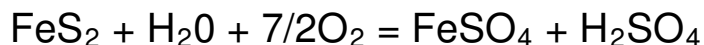
- а) трещиноватость пород
- б) избирательное растворение, связанное с неоднородностью пород по химическому составу.

в)различие в текстуре пород (слоистость, ориентированность зерен минералов и т.п.).

г)слоистость пород, межпластовые трещины.

д)различия в экспозиции поверхности пород (т.е., под каким углом поверхность повернута к югу, уклон поверхности)

е)сульфидные включения. Под действием воздуха и воды сульфидные включения (пирит - FeS_2) разлагаются с образованием серной кислоты:



Серная кислота тут же реагирует с карбонатными породами.



Виды карров:

- Лунковые (каменицы - народное название). Коррозия, выдувание, лишайники - действующие факторы. Диаметр от 3-5 см до 1,5м. Глубина до нескольких десятков см.

-Желобковые. Глубина до 3 см, длина до 1м. и более. Коррозия тонкими струйками стекающего дождя. По всей длине имеют постоянную ширину.

-Бороздчатые карры. Образование - коррозия сомкнутых трещин (напр. межпластовые карры). До 3-5м в глубину и до 7-10 м. в длину. В отличие от желобковых карров в нижней части могут значительно расширяться.

-Стенные карры. Диаметр от 3-5 см. до 5-7 м. Как округлой так и линейной формы. Образуются на вертикальных и отрицательных поверхностях.

-Русловые карры. Эллипсоидовидные углубления в руслах рек, ванны и проч. Диаметр от десятков см. до первых метров.

КАРСТОВЫЕ РВЫ. Нивально-гляциальная или коррозионная проработка раскрытых тектонических трещин. Длина до 30 и более метров, глубина до 10 м.

ПОНОР. Форма рельефа, по которой вода уходит вглубь карстового массива. Это не самостоятельная форма рельефа, а гидрогеологическая функция. В качестве понора могут выступать воронки, пещеры, колодцы, шахты. Тогда говорят о воронке-поноре, пещере-поноре и т.д.

КАРСТОВЫЕ ВОРОНКИ. Виды:

-Коррозионные (воронки поверхностного выщелачивания)

-Провальные (гравитационные). Образуются при обрушении подземной карстовой полости.

-Суффозионные (воронки просачивания).

-Эрозионные. Проработка первых трех видов воронок ливневыми потоками.

Возможны комбинации нескольких процессов. Тогда говорят, например: коррозионно-эрозионная воронка и т. д. Размеры воронок - обычно до 10 м., крупные - до 100м в диаметре. Образуются на склонах не круче 15 градусов, редко - до 30-40 градусов.

КАРСТОВЫЕ АРКИ. Образуются:

1.Деструкция подземных полостей, арка является останцом.

2.Соединение соседних воронок через морозозабойную нишу в днище одной из воронок. Обычно это происходит если одна воронка расположена выше по склону, чем другая.

3.Бывают также арки эолового происхождения (выдувание ветром). Но такая арка - не карстовая.

Сложные формы поверхностного карста: карстовые ложбины, карстовые котловины, карстовые долины, поля.

КАРСТОВЫЕ ЛОЖБИНЫ. Образуются из соединившейся цепочки воронок. В продольном сечении имеет пилообразный профиль дна. Исходные воронки расположены цепочкой либо потому, что образовались в дне речного русла, либо потому, что тяготеют к тектоническому разлому.

КАРСТОВЫЕ КОТЛОВИНЫ. Отличаются от воронок не по размеру (он может быть одинаковым), а по генезису. Воронка - простая форма и имеет один отводящий канал, а у котловины их несколько. Образуются котловины:

а).Разрастание воронки и образование в ее склонах дочерних, более мелких воронок.

б).Слияние нескольких воронок. Образуется котловина до 1км. в диаметре.

в).Преобразование эрозионной или гляциальной формы рельефа в карстовую форму. Это унаследованная форма рельефа. Например, троговая (ледниковая) долина после развития в ней карстовых процессов превращается в карстовую котловину.

г).Провальные карстовые котловины образуются при обрушении значительных подземных карстовых полостей.

КАРСТОВЫЕ ДОЛИНЫ. Унаследованная форма рельефа - речная долина или троговая долина преобразуется в линейно вытянутую карстовую долину. Как правило это цепочка карстовых котловин.

ПОЛЬЯ. (ед. ч. - полье). Вогнутая область площадью до десятков квадратных километров. Образуется как общее понижение рельефа при площадных обрушениях подземного карста, слияния множества карстовых котловин, общей химической денудации рельефа.

ОСТАНЦОВЫЙ тропический карст. На территории бывшего СССР встречается только в виде погребенных форм (Урал). Характерен для тропического климата. Интенсивность коррозии может быть такова, что целые области полностью уничтожаются на глубину в десятки и сотни метров. В результате образуется плоская равнина с

редкими отдельно стоящими останцами - столбообразными блоками пород, не подвергшихся коррозии.

II. ПОДЗЕМНЫЕ КАРСТОВЫЕ ФОРМЫ. Любая карстовая полость есть дренажная система, альтернативная поверхностной речной сети. Поверхностный водосбор не равен подземному водосбору. Отличие поверхностной речной сети от карстовой водоносной системы:

- 1). У карстовой системы нет водоразделов.
- 2). В карстовой системе возможны восходящие токи воды (например, в сифонах).
- 3). Карстовые русла могут залегать одно над другим, пересекаться.
- 4). Подземные русла не могут выработать широких долин из-за неизбежного обрушения.

Карстовой водоносной системой называется путь, который проходит вода от поверхности, через толщу карстового массива и до выхода на поверхность. Начинается понором или областью просачивания и заканчивается пещерой-источником или родником.

Инфильтрация - просачивание воды вглубь массива.

Инфлюация - втекание в массив в виде потока.

Сифон - часть пещеры, под потолок заполненная водой и имеющая с двух сторон выходы в незатопленные части. Сифоны образуются тогда, когда карстовая полость какой-то своей частью погружается ниже уровня грунтовых вод. С гидрогеологической точки зрения область под зеркалом грунтовых вод называется зоной сифонного движения воды. Самый длинный сифон в мире - Ду де Коли, длиной 4055 м. и глубиной 30 м. (Франция).

Гипокарст (в противоположность нормальному карсту) - карстовые полости, образованные или существующие ниже уровня грунтовых вод. Либо процессы карстообразования в зоне сифонного движения воды. Гипокарст образуется:

- а). Опускание местности и затопление уже существующего карста.
- б). Поднятие уровня грунтовых вод.
- в). Растворение пород в зоне сифонного движения воды.

Пещера-источник. Нижняя часть карстовой водоносной системы, если выход вод на дневную поверхность происходит через открытую карстовую полость (пещеру). Обычно в виде ручья, текущего по дну пещеры.

Воклюз - карстовый источник во Франции. Глубина -255 м., самый глубокий источник в мире.

воклюз - любой сифон-источник с большим дебетом (расходом) воды.

Карстовая полость как результат чисто эрозионного процесса. Русло как подземной так и поверхностной реки в процессе своего развития вырабатывает некий продольный профиль, называемый *профилем равновесия*

. Приблизительно его можно аппроксимировать экспонентой. Пример: овраг. В верхней части оврага преобладает эрозия текущей водой, здесь основное русло идет по довольно крутой кривой. В нижней части оврага, где уже заметны процессы аккумуляции (отложения осадков) русло выполаживается в практически горизонтальное. Таким образом, профиль равновесия есть результат некоего равновесия эрозии и аккумуляции.

Профиль равновесия асимптотически подходит к базису эрозии.

Базис эрозии - тот уровень, на котором кинетическая энергия воды либо падает до нуля, либо ее не хватает на дальнейшую эрозию. Например, базисом эрозии может служить большое озеро. Как только овраг углубился до уровня озера, эрозия вглубь останавливается, так как бегущая вода, впадая в стоячую воду, тут же теряет всю свою кинетическую энергию.

Глобальные базисы эрозии - океан, крупное озеро.

Местный базис эрозии - река, уровень грунтовых вод, бронирующий пласт.

Временный базис эрозии - каменные завалы, водобойные ямы под водопадами. Реальный профиль равновесия, хотя и аппроксимируется экспонентой, при более детальном рассмотрении оказывается ступенеобразным чередованием горизонтальных и вертикальных участков. Применительно к подземным рекам, которые также вырабатывают профили равновесия, это выражается в чередовании шахт, колодцев и меандров.

Колодцы - вертикальные полости менее 20 м. глубиной.

Шахты - то же, более 20 м.

Меандры - горизонтальные и субгоризонтальные участки подземных русел.

Катушки - жаргонное название наклонных участков. В верхней части подземного русла шахты преобладают над меандрами. В средней части шахты сменяются колодцами, меандры становятся длиннее. В нижней части колодцы встречаются все реже, появляются сифоны. На практике мы никогда не имеем дело с полным профилем равновесия,

карстовые полости оказываются некоторым фрагментом полного профиля. По соотношению горизонтальных и вертикальных участков мы можем понять, с какой частью мы имеем дело. Если появились сифоны, то вряд ли стоит ожидать большого углубления системы, а вот значительное удлинение вполне возможно.

Многоэтажный карст. Довольно часто пещера представляет из себя серию параллельных русел, из которых одно обводнено, а остальные сухие. Последние находятся на разных гипсометрических уровнях и соединены между собой забитыми обломочным материалом щелями, узкими ходами. Многоэтажный карст образуется при быстром смещении базиса эрозии при тектонических движениях массива. Если базис опустился, профиль равновесия становится неустойчивым, резко возрастает эрозия дна полости и вода быстро пропиливает узкую щель до тех пор, пока не достигнет нового устойчивого профиля равновесия. Если же базис эрозии, наоборот, поднялся, то нижний этаж будет погребен обломочным материалом (погребенный карст), а новый профиль равновесия будет выработан выше. В Бельгии бурением вскрыты погребенные полости на глубине 1 км. ниже уровня моря.

Горизонтальная конфигурация пещеры контролируется следующими факторами.

1. Субвертикальные тектонические разломы, часто это система параллельных разломов.

2. Трещины напластования. Если породы лежат наклонно, то полость закладывается преимущественно в плоскости таких трещин. Причем так, чтобы русло не поднималось вверх. То есть в диапазоне 180 градусов.

Если, например, азимут падения слоев 95, то полость будет залегать по горизонтальному азимуту от 5 до 185.

3. Уровень грунтовых вод. Зеркало грунтовых вод далеко не всегда имеет строго горизонтальную конфигурацию. Обычно поверхность понижается вблизи долин, других понижений рельефа. Точно так же, как вода стекает вниз по склону, так же подземная река будет стекать в сторону понижения зеркала грунтовых вод. Именно так и будет направлена пещера.

4. Модуль трещиноватости. То есть степень ослабленности пород трещинами. Если между двумя монолитными блоками залегает тонкий слой рыхлых пород, то с большой вероятностью можно сказать, что пещера будет тяготеть к этим ослабленным породам.

5. Равнинные реки, имеющие долины в несколько километров шириной, обычно меандрируют (петляют). Меандрирование и широкие долины характерны для водотоков, приближающихся к базису эрозии. Подземные реки не могут выработать широкой долины, но и они могут образовывать небольшие петлеобразные изгибы в нижних частях водоносной системы.

Генетические типы карстовых полостей.

1). Коррозионно-гравитационные. Если блок на боковом склоне плато отсядет, сползет по трещине бортового отпора, то такая раскрытая трещина может корродироваться дождевыми водами. Образуются субвертикальные полости высотой до первых десятков метров. Натечных форм нет, спортивного интереса такие полости не представляют.

2). Нивально-коррозионные. Обычно это колодцы и шахты, забитые снегом, фирном (зернистым снегом), в

корневых частях - глетчерным (массивным) льдом.

Перелетывающие снежники. Натекон нет. [Пример: ПЗ-5](#)

3). Коррозионно-эрозионные. Основная масса спортивных пещер относится к этому типу. Обилие натекон, но не обязательно. Выработанный профиль равновесия.

4). Вскрытые пещеры. Комбинация 2) и 3).

5). Горизонтальные пещеры лабиринтного типа. Самая длинная в мире - Мамонтова (США) - 563 км. Вторая в мире - Оптимистическая (Подолия, 207 км.).

ОТЛОЖЕНИЯ ПЕЩЕР.

- Остаточные. Если нерастворимая часть карбонатной породы (глинистые и песчаные частицы) не уносится водными потоками, а остается на месте своего образования (так называемая "глинка"), то это элювий.

- Обвальнo-гравитационные. Обвалы. Глыбы, щебень.

- Речные отложения - аллювий, аллювиальные. Песок, галька, гравий.

- Криогенные. Продукты ледниковой деятельности. В нижних частях нивально-коррозионных колодцев. Обломки разного размера.

- Биогенные. Гуано (тропические пещеры), экскременты летучих мышей, в привходовых частях - кости упавших животных, стволы деревьев.

- Хемогенные. Все виды натечных образований:

а). Сталактиты, сталагмиты, сталагматы (сросшиеся в колонну сталактит и сталагмит), облицовка стен, занавеси, портьеры (если источник раствора не точечный, а линейный - щель), палки, пагоды, медузы, колонны, каменные плотины, каменные водопады. Все

перечисленные формы имеют одно происхождение.

б).Макаронины. Если сталактит имеет сосулькообразную, коническую форму, то макаронины имеют по всей длине (до метра и более) примерно одинаковую толщину. Зерна слагающего его кальцита более крупные, полый канал в макаронине имеет диаметр до нескольких мм., а у сталактита он очень тонкий.

Сталагмит канала не имеет вовсе.

в).Кораллиты (на западе их называют ботриоидами). Механизм их образования до конца не ясен. Вероятно, они образуются диффузией ионов из окружающих пород через водные пленки, конденсирующиеся на стенах полостей. Обычно образуются на боковых стенках и дне пещер.

г).Кристаллиты. Пучки хорошо выраженных кристаллов кальцита (до первых см.), растущие из вершин кораллитов.

д).Геликтиты. От греческого слова "геликос" - скрученный. Сталактит растет строго по вертикали, поскольку его рост контролируется силой тяжести. Рост геликтита контролируется не силой тяжести, а кристаллизационной силой. Кристалл представляет собой параллельные ряды атомов и следующий ряд подстраивается к предыдущему. Таким образом, рост происходит по оси роста кристалла, которая может быть ориентирована в пространстве как угодно. Поэтому, направление роста геликтита также не зависит от силы тяжести. Скручивание происходит из-за примесей других атомов. Если в слое одинаковых атомов появляется чужеродный атом, то следующий слой не будет

параллелен предыдущему, и направление роста кристалла изменится. Геликтит представляет из себя сросток параллельных волосовидных кристаллов кальцита или арагонита.

е). Лунное молоко (moonmilk). Мелкодисперсная влажная масса, наподобие мокрого зубного порошка. Представляет из себя зародыши кристаллов кальцита, рост которых блокировался адсорбцией ионов магния поверхностью зародышей. Поэтому уже образовавшиеся микрокристаллы далее не растут. Но раствор пересыщен карбонатом кальция и последний должен выпадать в осадок. Выпадают все новые кристаллы, рост которых тут же блокируется.

ж). Антолиты. Игольчатые кристаллы легкорастворимых минералов (гипс и др.) на дне высохших луж, озер. Характерны для южных, тропических пещер, где влажность не высока и возможно высыхание. В условиях Кавказа иногда встречаются на значительных глубинах, где температура может увеличиваться на 5-10 градусов. В среднем температура пород увеличивается на 1 градус на каждые 33 м. глубины. Говорят: геотермический градиент равен 1 градус/33м.

з). Пизолиты (пещерный жемчуг). Неприкрепленная форма, округлые образования до 1-2см. в диаметре на дне подземных озер.

е). Пленки, забереги, оторочки, блюдца - все это по берегам подземных озер.

ЦИКЛЫ РАЗВИТИЯ ПЕЩЕР. 1. Образование полости. Чистая эрозия + коррозия. Обвалы, бурные потоки воды. Натёки и кристаллические образования не встречаются.

Большинство абхазских пещер находятся на этой стадии развития.

2. Уменьшение притока воды, уменьшение эрозии. Вода стекает струями по стенам пещеры. Образуются крупные натёки: облицовка стен, пагоды, колонны, травертиновые плотины, каменные водопады. Много озер, пизолиты.

3. Приток воды еще меньше, по каплям. Макароны, тонкие сталактиты.

4. Приток воды еще меньше. Вода конденсируется из воздуха. Рост кораллитов благодаря диффузии. На концах кораллитов - кристаллиты.

5. Полное высыхание пещеры. Карст стареет. Реликтовый карст. Пещеры Крыма в большинстве своем находятся на этой стадии развития. Перечисленные пять стадий могут повторяться. Известны пещеры, где прошло шесть полных циклов. Какие-то стадии могут выпадать, развитие может остановиться на каком-то этапе.

ПОЧЕМУ в одних местах карст развит сильно, в других, внешне очень похожих местах, он отсутствует? Бывает, что интенсивность карстообразования меняется в пределах какой-то сотни метров.

1) Уровень грунтовых вод. Пример. Московская область. Карстующиеся породы имеют мощность до сотни метров, найден погребенный карст, но современный карст практически отсутствует. Причина: грунтовые воды залегают на глубине 5-10м.

2) Химическая инертность пород. Примеси магния резко снижают интенсивность карстообразования. Пример: Скалистый хребет в Северной Осетии.

3) Примеси глинистого материала. Микротрещины

забиваются глинистыми частицами (кольматация трещин). Поэтому карст не развивается по мергелевым толщам.

4) Экспозиция склона. Более благоприятен северный склон, так как там больше влажность и дольше держится снеговой покров (более интенсивны нивальные процессы).

5) Рельеф. Особенно благоприятны закрытые котловины, днища с откосами до 15 градусов.

6) Почвы. Мощность и биология почв влияют на обогащение вод углекислотой и, следовательно, на интенсивность карстовых процессов. Горные черноземы, горные лесные почвы особенно благоприятны.

Неблагоприятны скелетные маломощные почвы.

7) Механические свойства пород. Трещиноватость, напластование. Пример. Арабика. Карст особенно интенсивен на участках, где пласты известняка залегают крутонаклонно или даже субвертикально.

8) Количество осадков. Климат. Интенсивность испарения. Нивация. Пример: Кавказ. Области мощного карстообразования находятся на высотах от 1000 до 2200 м. Ниже слишком сухо, выше - большую часть года не сходит снежный покров.

МИНЕРАЛЫ ПЕЩЕР. Известняк состоит из минерала кальцита. Доломитизированный известняк состоит из высокомагнезиального кальцита (ВМК) + доломит или из чистого ВМК. Например, доломиты из Щелково (Московская обл.). По внешнему виду как известняк, но желтоватого цвета.

Коррозия известняка есть процесс химического растворения кальцита под действием атмосферной

углекислоты CO_2 .

Кальцит CaCO_3 малорастворим в воде.

$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ легко растворим в воде:

$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 = \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ (динамическое равновесие).

РАСТВОРЕНИЕ КАЛЬЦИТА есть химическая реакция образования гидрокарбоната кальция.

При увеличении давления CO_2 в атмосфере реакция сместится вправо, в сторону растворения кальцита. При падении давления CO_2

реакция смещается влево, при этом из раствора выпадает осадок (кальцит). Образуются натеки.

Нормальное давление CO_2 в атмосфере $P_{\text{CO}_2} = 10^{-3,5}$

атм. ($=0,04\%$).

Давление в почвенной атмосфере $P_{\text{CO}_2} = 10^{-2}$ атм. ($=1\%$)

Кстати, человек теряет сознание при $4\% \text{CO}_2$. Существуют "собачьи" пещеры: углекислота как более тяжелый газ стелется по низу и собаки при их малом росте легко погибают.

Концентрация CO_2 в почве выше за счет:

а) дыхание почвенной фауны;

б) дыхание бактерий;

в) разложение органики.

Дождевая вода, просачиваясь через такую

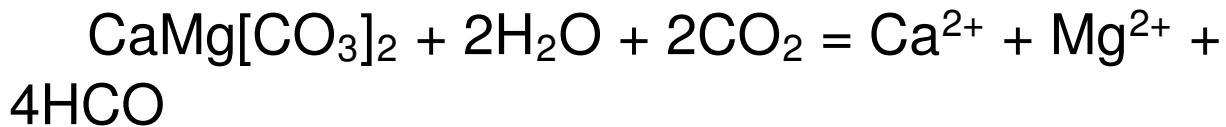
почву, обогащается углекислотой, при этом растворимость кальцита увеличивается в пять раз. Сразу под почвой вода растворяет слои кальцита. Так образуются подпочвенные карры, по сути дела являющиеся подпочвенным микрорельефом. Далее вода просачивается вглубь массива, попутно растворяя окружающий известняк. Пусть теперь капля этой воды, насыщенной углекислотой и растворенным известняком, появляется на потолке пещеры. Если пещерная атмосфера имеет низкие содержания CO_2 , то происходит смещение реакции влево и выпадение кальцита. Так образуется сталактит. Поэтому важно помнить, что процесс образования натеков ничего общего не имеет с высыханием. Это тем более очевидно, поскольку в подавляющем большинстве пещер 100% влажность и высыхание невозможно. Итак, натёки есть продукт химического осаждения. Почему в пещере давление углекислоты близко или равно атмосферному?

1) Либо пещера имеет открытый выход на поверхность.

2) Либо такого выхода нет, но есть бурный поток воды, который в виде пузырьков несет воздух атмосферного состава и таким образом

контролирует состав пещерной атмосферы. В полностью закрытой системе без водотоков натеки не образуются.

РАСТВОРЕНИЕ ДОЛОМИТА.



$$\text{Отношение } \text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+} = 1$$

Если растворяется одновременно кальцит и доломит, как оно и случается в природе, то $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+} = 1$

>> 1 Когда растворяется кальцит, то обратная реакция приводит к выпадению кальцита же. Когда растворяется доломит, то выпадает не доломит, а кальцит, арагонит или высокомагнезиальный кальцит. Почему так? Отвечает на этот вопрос химическая кинетика - раздел химии, изучающий условия протекания химических реакций. Доломит более химически инертен, чем кальцит. Он плохо растворяется даже в ненасыщенных растворах. Вода, просачиваясь через доломитизированные известняки, растворяет почти исключительно кальцит. Чтобы начал растворяться доломит, вода должна быть ненасыщена по отношению к нему минимум в 10 раз. Чтобы доломит выпал в осадок,

отношение Ca

2+

/Mg

2+

должно быть > 1. Но растворялся в первую очередь кальцит, и соотношение явно

7

7

N

14

+ e

-

Период полураспада $T_{1/2}=5730$ лет. Таким образом, в атмосфере постоянно присутствует некоторое количество радиоуглерода, который медленно распадается, но одновременно и образуется вновь. Атмосферный углерод вместе с CO_2 захватывается, например, растениями. Так радиоуглерод оказывается в древесине, в углях костра.

Соотношение C

¹² и

C

13

не меняется во времени, поскольку они не распадаются. А отношение C

14

к С

13

и С

14

к С

12

меняется. Зная среднее содержание радиоуглерода в атмосфере и сравнивая его с содержанием в древесине, мы можем определить возраст древесины по формуле:

$$X_t = X_0 * e^{-kt},$$

где X_0 исходное содержание радиоуглерода, X

t

- содержание в данный момент времени, e

-экспонента, t - возраст предмета, $k = \ln 2 / 5730$

Хорошо датируются предметы возрастом до 100 тыс. лет. Более древние образования датируются со все более возрастающей ошибкой.

Радиоуглерод захватывается не только древесиной. При растворении кальцита, как мы помним, один атом углерода поступает из известняка, а другой из атмосферы:



Если теперь из раствора выпадет осадок, то половина атомов в нем будет атмосферного происхождения. В известняке радиоуглерода нет,

так как породы имеют возраст в десятки и сотни миллионов лет и весь C^{14} в них распался. Поэтому, получив при анализе образца натеков содержание C^{14} мы увеличим его в два раза и рассчитаем возраст натека. Таким образом мы датируем не саму пещеру, а возраст натеков, то есть 2, 3 и 4 стадии образования пещер. На 1 и 5 стадиях натеки не образуются. Но есть в данном методе серьезные осложняющие трудности.

а). Солнечная активность сильно меняется по интенсивности. Следовательно и содержание C^{14} в атмосфере сильно меняется. К счастью для нас, сталактиты образуются медленно, десятки и сотни лет. Поэтому мы оперируем средними значениями концентрации в атмосфере. Анализируемые пробы также должны представлять некий средний состав натека, а не точечную пробу.

б). Фракционирование изотопов. Мы предполагаем, что изотопный состав древесины или натека в точности наследует состав атмосферы. А вдруг растения захватывают какие-то изотопы более активно, чем другие? В случае с растениями так оно и есть. Но эта проблема решается введением соответствующих поправок.

3). Скорость обмена между атмосферой, почвенной атмосферой, подземными водами и образующимся натеком. Сколько времени проходит от момента образования атома радиоуглерода до момента включения его в натек? Предполагается, что воздухообмен все-таки достаточно интенсивен и данной временной задержкой можно пренебречь.

Возраст натеков определялся во множестве пещер по всему миру. Результат оказался несколько неожиданным: практически все ныне существующие пещеры (исключая погребенный карст) оказались моложе 1 млн. лет, причем основная масса пещер имела возраст до 100 тыс. лет. Таким образом, пещеры по геологическим меркам очень молодые образования с очень коротким периодом жизни. Возраст их сопоставим с возрастом поверхностных рек.