

Александр Дегтярёв

Подземная геоморфология в популярном изложении.

= Геоморфология карстовых полостей.

Часть 1. Подземные залы и геометрия арочных сводов.

Прочность сжатия и прочность растяжения. Начнем с простейшего случая: детские кубики, поставленные вертикально друг на друга. Такая колонна из кубиков стоит, несмотря на то, что сцепление между кубиками равно нулю (рис. 1а). Но небольшой боковой удар опрокинет всю колонну. А теперь сожмем тот же ряд кубиков с двух концов. Устойчивость конструкции резко увеличилась. Ее можно даже держать горизонтально (рис. 1б). По этому же принципу строят

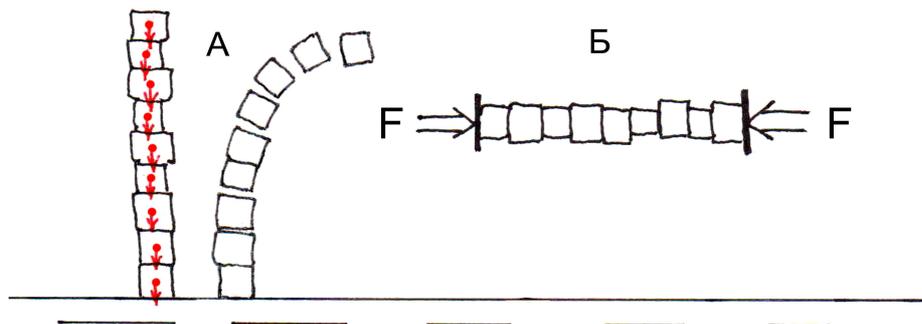


Рис. 1

сверхвысокие здания типа Останкинской телебашни. Она не падает потому, что система натянутых канатов, протянутая сквозь всю башню, сжимает ее между верхней частью башни и землей (рис.2). Сжимающие усилия делают конструкцию устойчивой.

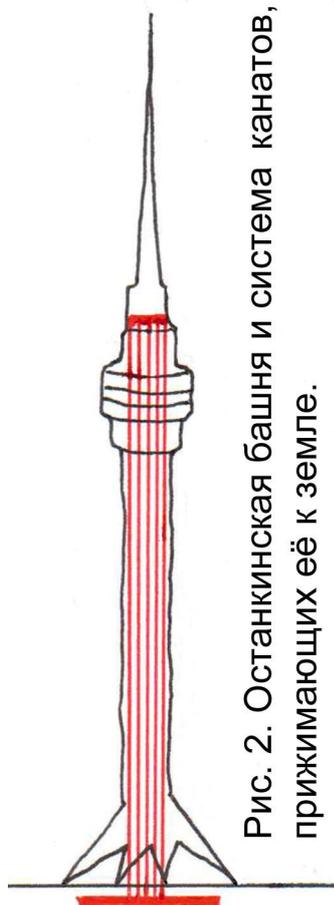


Рис. 2. Останкинская башня и система канатов, прижимающих её к земле.

Теперь попробуем растянуть эту же конструкцию из кубиков. Она мгновенно рассыплется. Ее прочность растяжения оказалась равной нулю. Итак, мы видим большую прочность при сжатии и нулевую при растяжении одной и той же конструкции.

Теперь перенесем данные наблюдения на свойства карстующейся породы. Чаще всего это известняк той или иной степени монолитности (или наоборот, той или иной степени трещиноватости). Совершенно лишённые трещиноватости известняки встречаются крайне редко и практически не карстуются. Или, точнее, карстуются только по поверхности пласта. Поэтому детские кубики достаточно хорошо моделируют реальный известняк, разбитый трещинами в нескольких направлениях.

Общий и очень важный вывод мы должны запомнить: *нагруженные конструкции могут быть гораздо более устойчивыми, чем не нагруженные*. Разумеется, не во всех конфигурациях и до известных пределов.

Породы монолитные, трещиноватые, сыпучие и жидкие. Монолитные породы это породы с прочностью растяжения выше нуля. Тут, конечно, надо оговаривать, о каком масштабе идет речь. В масштабе миллиметра даже песчинка будет монолитной. Нас интересует масштаб, сопоставимый с масштабами подземного зала, хода или иной подземной полости. Допустим, выступ потолка держится за счет прочности растяжения, т. е. за счет монолитности. Любая трещина, пересекающая такой выступ, приведет к отрыву породы. Напротив, арочный свод того же потолка может быть достаточно густо разбит трещинами, но будет держаться за счет сжатия, как держатся кубики на рис.1б.

Трещиноватые породы имеют нулевую прочность растяжения. Но их не

надо путать с сыпучими породами, подобными песку. Между трещиноватыми и сыпучими породами есть принципиальная разница. В трещиноватых породах при сжатии возникает трение в плоскости трещин. За счет этого трения кубики не рассыпаются. В сыпучих породах нет самих трещин, вместо них есть межзерновые пространства. Поэтому трение между частицами не возникает или оно очень мало. Трещиноватые породы мы моделировали кубиками. Сыпучие будем моделировать шариками. Частички песка круглые, их нельзя поставить друг на друга как кубики, но их можно насыпать горкой. При этом верхний шарик-песчинка будет опираться на три песчинки второго ряда (рис.3а). Каждая из песчинок второго ряда — на три песчинки третьего ряда — и так далее.

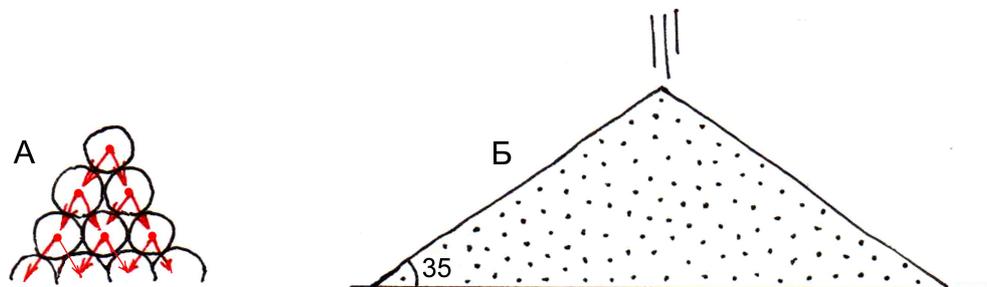


Рис. 3.

Существуют также породы, не подходящие ни под определение монолитной, ни под определение трещиноватой или сыпучей пород. По своей физике это жидкости. Их нельзя моделировать шариками, и угол естественного откоса у них равен нулю. Простейший пример — вода. Сюда же можно отнести лед и каменные соли. Все это жидкости, различие лишь в их вязкости. В жидкости, разумеется, невозможны длительно существующие полости. Ледяные пещеры могут существовать до нескольких лет, после чего постепенно под давлением заплывают. Если слой льда меньше 15 — 20 м., то он почти перестает течь, полости во льду могут сохраняться дольше - до десятков лет. Каменная соль под большим давлением также проявляет свойства жидкости, но масштаб времени тут уже идет на тысячи и даже десятки тысяч лет. Известны, например, соляные выработки, сохраняющиеся без изменений уже сотни лет. Но в масштабах сотен тысяч лет соляные пещеры существовать не могут.

Давление вертикальное и боковое. В сыпучих породах карстовые формы, даже поверхностные, не образуются главным образом потому, что механическая эрозия действует гораздо быстрее. Тогда чем нам интересны сыпучие породы, применительно к карстологии? Тем, что на примере сыпучих пород мы можем увидеть, как вертикальное давление перераспределяется в горизонтальное. В шариковой модели (рис. 3а) видно, как зерно верхнего ряда опирается на три зерна следующего ряда. Вертикальная нагрузка при этом перераспределяется на три направления, отклоняющихся от вертикали. Такое перераспределение давления в сыпучих породах выражается в угле естественного откоса (рис. 3б). Для сухого песка он находится в диапазоне 34 — 40 градусов. У идеальной треугольной пирамиды из шариков он будет 48 градусов. В жидкостях давление перераспределяется по всем направлениям. Здесь давление вверх или вниз или вбок или под углом будут одинаковы. Поэтому туннели в скальных породах делают с плоским полом и арочным потолком, а в плавнуках тубинги укладывают идеально круглым профилем. Мокрый песок по мере увлажнения по свойствам все ближе подходит к жидкостям. Туннель в такой жидкости может схлопнуться не только со стороны потолка или боковых стенок, но и со стороны пола. Если в

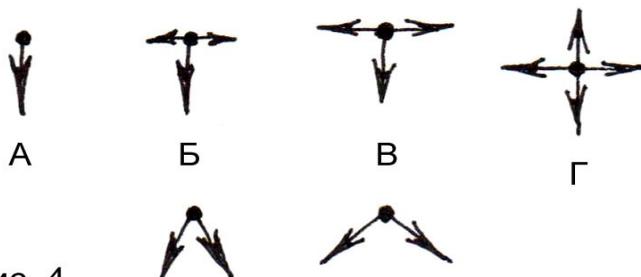


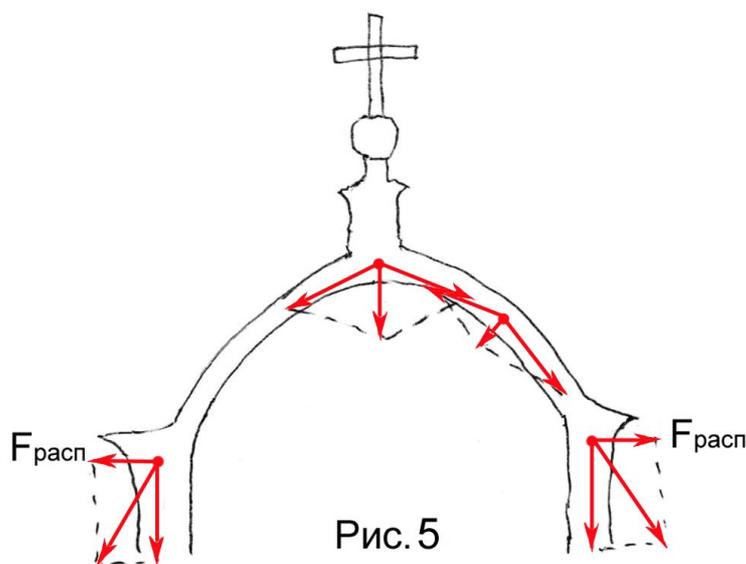
Рис. 4.

монолитных породах давление в основном вертикальное (рис. 4а), в сыпучих и трещиноватых породах появляется горизонтальная составляющая (рис. 4б, 4в), а в плывунах мы имеем дело уже с гидростатическим давлением, одинаковым по всем направлениям (рис. 4г).

Горное давление. Трещиноватые породы занимают промежуточное положение между монолитными и сыпучими. В них возникают значительные горизонтальные силы сжатия. О существовании таких сил хорошо знают горняки. Породы на глубинах в сотни метров и даже километров сжаты давлением как пружина. Когда горная выработка срезает напряженный пласт, давление перестает быть уравновешенным как в вертикальных, так и в горизонтальных направлениях. «Пружина» может мгновенно распрямиться. Особенно это явление характерно для хрупких пород, таких как антрацит. За состоянием потолка в выработках следят особенно внимательно, не делая потолки слишком широкими или подпирая их креплениями. Но не надо забывать, что боковые стенки не менее опасны: порода стенок может мгновенно, взрывообразно вылететь в штрек (так называемый «горный удар»). Горные удары наблюдаются в угольных шахтах, начиная с глубин 200 м. Горный удар это крайнее, локальное проявление горного давления.

Горный удар мог бы быть значительным фактором в карстогенезе. Карстующиеся породы также находятся под колоссальным давлением. Например, для Абхазии это могут быть глубины 2000 и более метров от поверхности. И карстовые полости точно так же, как и горные выработки срезают напряженные зоны пород. Но, во-первых, известняк — порода менее хрупкая, чем антрацит. А во-вторых, процесс срезания пород занимает десятки и сотни тысяч лет. Фактор времени тут решающий. Благодаря трещинам и циркулирующим по ним растворам происходит перекристаллизация вещества, пиковые напряжения успевают перераспределиться и взрывного разуплотнения пород, по-видимому, никогда не происходит. Но это не значит, что боковое давление не играет роли. Оно, как мы увидим ниже, играет важнейшую роль в формировании полостей. Особенно в формировании подземных залов.

Отступление первое. Архитектурные арки и их отличие от арок сводов подземных залов. Архитектурная арка предназначена для перекрытия значительных пролетов между стенами и колоннами. Если небольшой оконный или дверной пролет можно перекрыть простой горизонтальной балкой, то пролеты в 20 — 30 метров можно перекрыть только аркой. Различия между ними в том, что прочность балки это прочность на разрыв (на изгиб). И тут предел прочности очень маленький. А прочность арки это ее прочность на сжатие. Арка так и устроена, что вертикальную нагрузку (вес арки и ее надстроек) она перераспределяет в касательные к арке нагрузки, по сути переводит нагрузку в сжатие. Предельная прочность на сжатие на много порядков выше прочности на разрыв. Казалось, бы, проблема арки решается простой геометрией: рассчитываешь нагрузку, подбираешь подходящую кривизну арки и конструкция стоит. Но, к сожалению, у арки есть очень неприятный побочный эффект — распирающее усилие (рис. 5). Арка распирает стены, на которые опирается. И чем более плоской сделана арка и чем она тяжелее, тем сильнее распирающее давление.



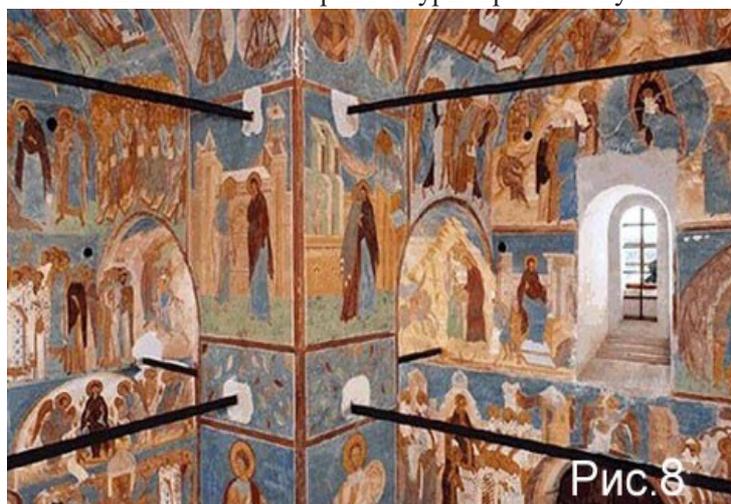
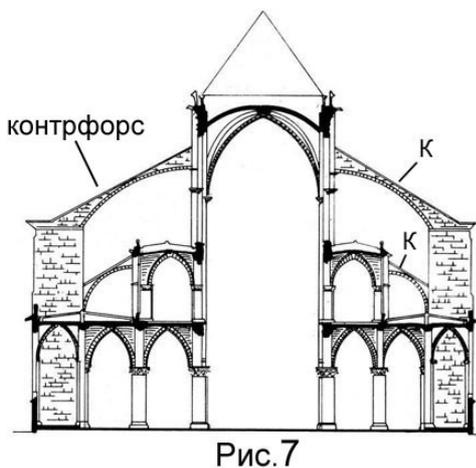
Главный купол Айя-Софии в Константинополе имеет диаметр 31 метр. Через несколько лет после

постройки собора (в 537 году) купол рухнул. «Лала Восточная часть Св. Софии, что под святым алтарем, и разрушила киворий (то есть сень) и святую трапезу и амвон. И признавались механики, что так как они, избегая издержек, не устроили поддержки снизу, но оставили пролеты между столбами, поддерживавшими купол, посему столбы и не выдержали. Видя это, благочестивейший царь воздвиг другие столбы для поддержки купола; и таким образом устроен был купол, поднимаясь в высоту более, чем на 20 пядей сравнительно с прежним зданием. (Хронография Феофана, 551 г.) Заметим, что летописец пишет как о чем-то важном, что новый купол приподняли на 20 пядей, т. е. на 3,5 м. Высота здания почти не изменилась, зачем же акцентировать на этом внимание? Речь тут идет о кривизне купола. Старый купол был ниже критического профиля и рухнул. Исправлением профиля купола не ограничились. Архитекторы VI века прекрасно знали, что купол может рухнуть не только из-за своей геометрии, но и из-за распирающего эффекта арки. Поэтому основание купола тоже усилили. Там, где купол подпирали обычные колонны, построили несущие стены.



Второе обрушение купола произошло в результате землетрясения 989 года. Новый, третий по счету купол построили еще более высоким. Но архитектор по имени Трдат, восстанавливая собор, понимал, что этого мало. Во время землетрясения купол может упасть из-за колебаний основания. Поэтому собор со всех сторон обложили мощными контрфорсами, гасящими распирающий эффект (рис.6). Снаружи здание ныне выглядит как хаотическое нагромождение пристроек, внешнее изящество было в значительной степени потеряно, но зато устойчивость теперь не вызывала сомнений. И следующую тысячу лет собор благополучно простоял, пережив несколько крупных землетрясений.

Контрфорсы готических соборов (рис. 7) решают ту же задачу: нивелировать распирающий эффект арки. А вот в русском зодчестве проблему решали по-другому. В классическом крестово-купольном храме под потолком вы обязательно увидите толстые металлические *стягивающие* балки, тянущиеся от стены к стене в арочных проемах. Это обязательный элемент архитектуры крестово-купольного



храма (рис. 8). Без него храм развалится. На внешних стенах, с обоих концов балки заканчиваются Т-образным завершением, которое и не дает стенам заваливаться наружу. Обычно эти завершения не видны под слоем штукатурки.

Совершив небольшой экскурс в историю архитектуры, и узнав, что такое распирающий эффект арки, мы можем перейти к арочным сводам естественных подземных залов обрушения. Отличие от архитектурной арки в том, что если нагрузка на арку собора всегда вертикальна, то на арочный свод подземного зала действует еще и боковое горное давление. Поэтому распирающий эффект такой арки полностью компенсирован встречным горным давлением.

Арка идеального сжатия. Пока карстовый массив еще не прорезан полостями, нагрузки внутри него распределены более-менее равномерно. Но как только появляется полость, нагрузки меняют свою конфигурацию. И если не произошло провала породы до самой поверхности, то это значит, что вес пород, расположенных точно над полостью, разложился по правилу параллелограмма и компенсировался касательными к арочной поверхности нагрузками. О какой арочной поверхности речь? Точно так же, как в куполе собора, в породах возникло сжатие. Физически это означает, что потолок полости слегка прогнулся под тяжестью пород и принял нагрузку. Смещение не заметно глазу: это могут быть считанные сантиметры. Но если архитектурную арку мы можем увидеть и снаружи и изнутри, то арку сжатия в породе мы, как правило, не видим: она скрыта за стенами зала. Хотя физически она существует (рис. 9). Назовем ее аркой сжатия или аркой идеального сжатия (АИС). Арка идеального сжатия это поверхность с (параболическим - ?) сечением, ниже которой вес вышележащих пород не действует. Потолочная поверхность зала вписана в арку сжатия. Арка

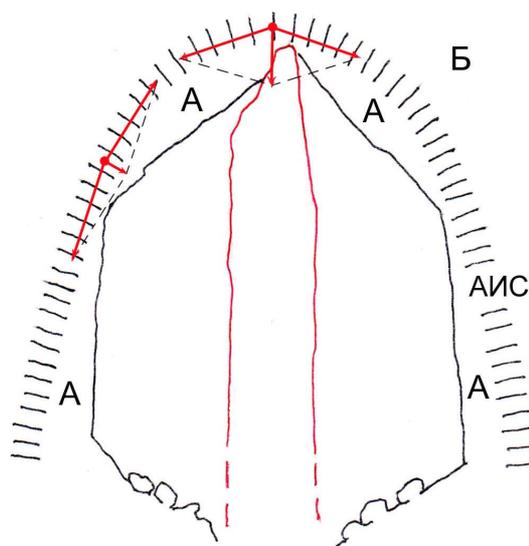


Рис. 9. Арка идеального сжатия (АИС) и образование зала внутри неё. Красным контуром показан исходный профиль хода. А - не нагруженные области, Б - внешняя область.
Стрелки - распределение сжимающих сил в АИС.

сжатия не может прорезаться полостью. Как только АИС прорезана, она больше не держит внешнее давление и область АИС отступает на такое расстояние, чтобы не быть прорезанной. Можно сказать и по-другому: *арка сжатия это поверхность полной компенсации горного давления*. Т. е. области А на рис. 9 не испытывают внешнего давления. И тогда получается, что породы в области А лишь висят на арке за счет монолитности с внешней породой. Иначе говоря, устойчивость в областях А определяется прочностью пород на разрыв. Любая поперечная трещина в области А приведет к отрыву породы. Таким образом, купол зала стремится расширяться до своей арки идеального сжатия и принять строго (параболическую - ?) форму. Причем, обрушение происходит не только с потолка, но и с боковых стенок. Если система трещин вмещающих пород достаточно редкая, то своды зала могут иметь любую неправильную поверхность, за которой трудно угадать арочную форму. В больших залах и в густо трещиноватых породах форма потолка часто имеет идеальную арочную форму.

В арке сжатия напряжения более сильные, чем в окружающих породах. Это и понятно: арка берет на себя вес столба пород над полостью. Напряженная, сжатая арка существует только благодаря

существованию полости и прогибанию потолка зала. До образования полости напряжения на этом участке были однородными.

Образование залов из высокого каньона. Когда мы видим огромные залы, шириной иногда до 100 м., возникает вопрос: куда все это упало? Первый напрашивающийся (и неправильный) ответ: подземная река мигрировала вбок, как это делают поверхностные равнинные реки. А когда «подземная долина» стала достаточно широкой, потолок в нее рухнул с образованием широкого зала. Однако это неверное представление. Ну, во-первых, попробуйте привести пример хоть одной такой долины в стадии до обрушения. Я таковых не знаю ни одной*. Во-вторых, в скальных породах боковая эрозия вообще до крайности затруднена. А когда речь идет о горных реках со значительным уклоном течения, то говорить о боковой эрозии можно лишь как о редчайших исключениях. Иногда это случается, когда река натывается на наклонный бронирующий пласт, который не в силах прорезать. Подземные реки это по сути те же горные реки, только прикрытые потолком. Поэтому их типичный профиль — узкий каньон с вертикальными стенками. Большие залы в пещерах со значительными реками - обычное явление и объяснять обычное исключительными обстоятельствами (наклонным бронирующим пластом) контрпродуктивно. Значит, подмыв боковых стенок тут ни при чем. И раз уж подземные каньоны мы уподобили поверхностным, то заметим, что между ними есть существенное отличие: подземные каньоны кверху всегда сужаются (они Λ -образные), а поверхностные всегда расширяются, причем значительно (они V-образные или U-образные). В чем принципиальное отличие мы поговорим позже.

Итак, куда же падают залы? Правильный ответ: *широкие залы образуются из узких высоких меандров при заваливании боковых стенок.* На рис. 10 показаны два сходных механизма расширения зала. Суть их одна: *постепенное разрушение всего пространства под аркой сжатия.* В верхнем ряду

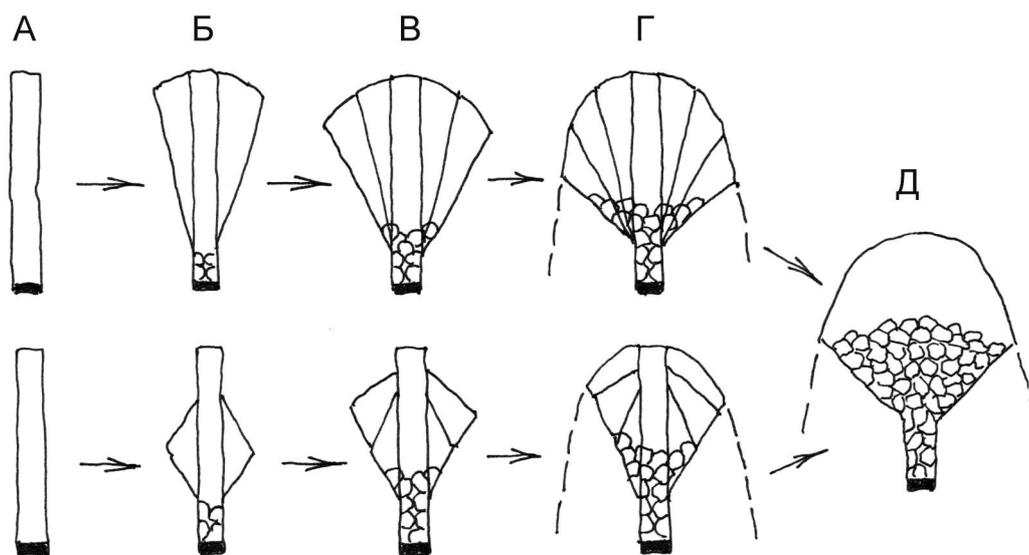


Рис. 10. Образование пещерных залов из узких каньонов

иллюстраций купол зала постепенно расширяется от зенита вбок, образуя в идеальном случае (параболическую - ?) арку. В нижнем ряду купол равномерно наращивается и в высоту и в стороны. Русло реки в обоих случаях заваливается обломками той или иной крупности. Скальное основание пола зала приобретает V-образную или Y-образную форму. Обычно основание скрыто под слоем обломков. Но иногда его можно видеть, как, например, в зале Икс (п. Снежная). Обломочный пол на ранних и средних стадиях развития зала имеет вогнутый профиль (стадия Г на рис. 10. Пример: зал Икс). Если обрушение продолжается, то пол становится выпуклым (стадия Д. Рис. 10. Пример: Тронный зал (п. Снежная)). Залы Икс и Тронный имеют идеальное (параболическое - ?) сечение, причем значительных размеров. Зал Икс: ширина до 75 м. при высоте 55 м.). Тронный: ширина до 110 м. при высоте 35. Но это, разумеется, лишь видимая часть. Под обоими залами под толщей обломков, текут реки, находятся они довольно глубоко под дном залов. И если мы построим профиль от уровня реки, то параметры Икса будут 90 м. высоты при 75 ширины, а у Тронного высота 120 - 130 при ширине 110. Под Тронным залом завал имеет мощность более 90 м.! Как видим, соотношение высоты

к ширине (если убрать обломочное заполнение) в обоих случаях приблизительно одно и то же, 1,2:1 или 1,3:1.

Соотношение ширины и высоты зала. Попробуем немного пофантазировать. Представим, что зал заложен в жидкости. Разумеется, это невозможно, зал мгновенно схлопнется. И все же, абстрагируемся от его неустойчивости и представим зал, на который со всех сторон давит одинаковое давление, как это и происходит в жидкостях (рис. 4Г). А роль зала у нас будет играть пузырек газа в бокале шампанского. Какая устойчивая поверхность у такого зала = пузырька? Сфера. Симметричное давление порождает симметричную конфигурацию полости. Теперь перейдем к случаю на рис. 4В, когда вертикальное давление сверху вниз равно по модулю боковому давлению. При этом давление снизу вверх отсутствует. Какая устойчивая поверхность полости в этом случае? Полусфера для потолка. Пол — любой формы. Конфигурация пола определяется уже не внешним давлением. Третий случай: боковое давление меньше давления сверху вниз. Давление снизу вверх снова отсутствует (рис. 4Б). Здесь устойчивой поверхностью потолка будет вытянутая вверх арка. Обычно ее считают параболой. Еще в начале XX в. горные инженеры пытались рассчитать давление на деревянные крепи при полной выработке горизонтального угольного пласта. Вот, что пишет «Горная энциклопедия»: «...были выдвинуты гипотезы о действии на крепь веса пород в пределах сводчатого объема с основанием равным пролёту выработки. Наибольшую известность получила гипотеза русского учёного М. Протодьяконова (1907), в которой указанный объем представляет собой параболический свод. Его высота (b) связана с полупролётом выработки (a) соотношением: $b=a/f$, где f — тангенс угла ϕ внутреннего трения для сыпучих пород или коэффициент крепости для связных». Другими словами, здесь написано следующее: породы, лежащие над полостью выработки оказывают давление на крепь только если они лежат ниже параболического свода, в который вписана выработка (рис. 11). Напомню, что здесь выработан горизонтальный пласт угля. Вес пород, лежащих выше этой параболической поверхности полностью компенсирован. Однако, нет

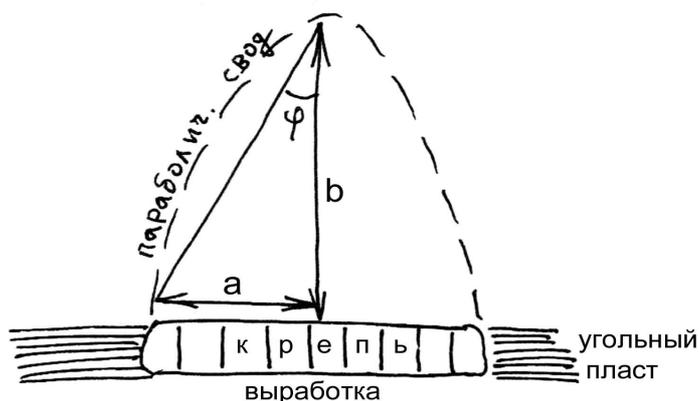


Рис. 11. Иллюстрация к формуле Протодьяконова

уверенности, что свод именно параболический. Не зря я после каждого упоминания о параболическом своде ставил знак сомнения (?). Во всей горной литературе пишут, что именно парабола. Но на самом деле это полуэллипс (в трехмерном варианте - полуэллипсоид). Ну хотя бы исходя из того, что сфера (пузырек шампанского) не является частным случаем параболы. А мы точно знаем, что в жидкости устойчивая полость будет сферическая. Зато сфера и полусфера являются частными случаями эллипсоида (сфера это эллипсоид, у которого фокусы совпадают).

Для полноты картины попробуем представить себе зал, в котором высота от высшей точки до уровня реки меньше, чем ширина зала. Устойчивой поверхностью свода зала при этом будет тот же эллипсоид, но вытянутый горизонтально. А это значит, что горное давление сверху вниз должно быть меньше, чем горизонтальное. Но такого не может быть. И значит все обвальные залы должны иметь высоту чуть большую или равную ширине зала. Вывод: если мы видим, что зал шире, чем высота от реки до верхней точки зала, то это значит, что форма зала не окончательная и он еще вырастет за счет обрушения потолка.

Когда начинается обрушение русла? Не все русла рушатся с образованием залов. Почему, допустим, Снежная река не являет собой непрерывную череду залов? Залы в Снежной занимают примерно 40% общей длины русла. Почему не рухнули остальные 60%? Была попытка объяснить это

тем, что залы образуются в месте слияния двух крупных водотоков. Однако взгляд на топосъёмку Снежной (рис. 12) легко опровергает такой вывод. Крупнейшие притоки (Невский ручей, Водопадный, ручьи Заблуждения, Заячий) не образуют залов в месте впадения. Не очень крупные притоки есть в залах Соединения, Победы, Гремячий, Космос, но вряд ли они ответственны за образование этих залов. И наоборот, большинство крупных залов не привязаны к сколько-нибудь значительным притокам. Значит, предположение неверное. Поищем другой ответ.



Рис. 12

Второй возможный ответ заключается в том, что существует некая критическая ширина русла, уже которой залы не образуются (безотносительно к высоте этого русла). По наблюдениям за руслом Снежной реки можно прикинуть, что такая критическая ширина равна *примерно* 5 метрам. Более широкие русла без обвалов мы не наблюдаем. Почему так? Дело в том, что если начнут рушиться стенки узкого каньона (а они и в самом деле рушатся), крупные обломки будут заклиниваться между стенками каньона, выполняя роль распорки и, таким образом, блокируя дальнейшее обрушение (точки А и Б на рис. 13).

Обломки диаметром более 5 метров (цифра несколько условна) — уже сравнительная редкость. Значит, начиная с условной ширины русла в 5 метров, даже самые крупные обломки начинают проваливаться до дна русла. Таким образом, развитие зала становится гораздо более вероятным. Второе соображение тоже достаточно тривиально: чем уже исходный каньон, тем он при разрушении быстрее заполнится обломками до самого верха. В этом случае зал сможет образоваться только на самых верхах поперечного сечения («В» на рис. 13). При этом размеры таких залов будут невелики (ведь площадь сечения конечного зала примерно равна или меньше площади сечения исходного каньона).

Такие залы хорошо известны как «вторые этажи» над Снежной рекой. При этом надо оговориться, что далеко не все «вторые этажи» образуются провалом породы в русло «первого этажа». Это лишь один из способов их образования. В основном залы второго этажа даже не находятся

непосредственно над руслом первого этажа, а значительно смещены в стороны. Но об этом позже.

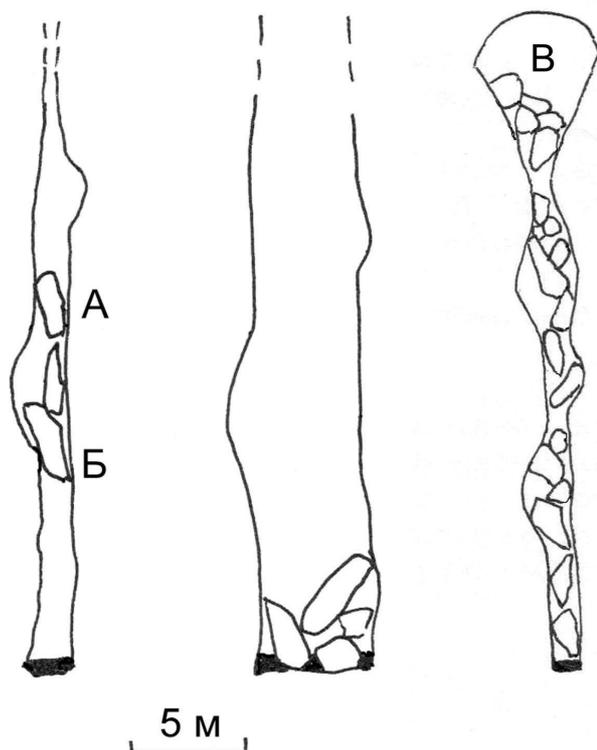


Рис. 13

Пограничный случай между рушащимся и не рушащимся руслом мы можем наблюдать, например, на Мелкой реке между залом Дольмена и залом Ожидания. Здесь нет еще даже микрозалов, но русло уже загромождено микрообвалами, которых на этом участке, кажется, около пятнадцати. Посветив вверх мы не увидим потолка, мы можем видеть щель, теряющуюся где-то вверху и то тут, то там висящие расклиненные глыбы.

Другой пограничный случай, но уже там, где критическая ширина русла превышена, это весь участок от зала ИГАН до Олимпийского водопада. Ширина каньона здесь местам до 15 - 20 метров, дно завалено крупными глыбами, но слой обломков невелик, река, текущая по монолитному полу кое-где видна. Стенки каньона почти везде вертикальные. Высота потолка превышает 50 и даже 90 м. Начиная от уровня +30 над полом зала ИГАН раскрытие зала в ширину уже произошло, ширина здесь достигает

50 м. Но нижние 30 м остались не раскрытыми. Т. е. потенциал для обрушения зала в ширину еще достаточно большой. Здесь мы видим процесс Zaloobrazovaniya в незаконченной стадии. Еще более раннюю стадию Zaloobrazovaniya можно наблюдать на участке Ревущих Каскадов. Здесь очень сильный уклон русла, на участке в 200 м. река набирает глубину в 60 м. В перспективе уступы будут попятной эрозией формировать высокий каньон, возможно, в верхней его части со временем сформируется новый водопад, а впоследствии и зал ниже водопада.

Вообще, рассмотрение не только развитых, конечных, но и промежуточных, а также начальных геоморфологических форм, рассмотрение разных этапов формирования подземных морфем — важный момент построения теории образования полостей. Морфемой мы будем называть часть подземной полости, сформированной преимущественно одним процессом, одной геоморфологической формой.

Прежде, чем полностью классифицировать подземные залы по генетическим типам, давайте рассмотрим пару примеров.

Зал Икс хотя и считается единым залом, на самом деле и по генезису, да и по форме это два смежных зала, причем с совершенно разными механизмами образования. На одной из старых топольских карт они даже подписаны отдельно: Большой Икс и Малый Икс. На рисунке 14 красным цветом даны три поперечных сечения через Большой Икс. Обратим внимание на то, что все три сечения геометрически подобны, но имеют резко различные размеры. Если большое сечение имеет размеры 55 высота и 75 ширина, то в районе Арки высота всего лишь 7,5 м. при ширине 23 м.

Обратим внимание на глубину реки под каждым из сечений. Мы помним из вышесказанного, что высота зала от реки должна быть равна или чуть больше ширины в этом же сечении. То, что река под Аркой находится очень близко, легко убедиться, если лечь и приложить ухо к полу: мы услышим близкий шум воды. До нее приблизительно 7-10 м. Плюс 7,5 м. до потолка, итого 15 — 18 м. Ширина в этом сечении 23 м. О чем это говорит? О том, что Арка не достигла своего полного профиля и может подрасти еще метров на 5 — 7. Но это естественно: чем меньше зал, или чем меньше сечение, тем ему труднее принять идеальную форму. Маленькие залы и гроты обычно имеют довольно грубо очерченные профили. Два других сечения зала, напротив, вполне сформировались: их высоты от уровня реки чуть больше ширины. Итак, мы уже отметили, что ширина зала является функцией

высоты исходного узкого русла, которое и начало рушиться с образованием зала. Значит на месте Большого Икса раньше был узкий каньон с большим уклоном. Что-то типа нынешних Ревущих каскадов. Под нынешней Аркой он был не выше 15 м., а в конце участка, в районе нынешнего шкуродера Ещенко, высота каньона была около 90 м.

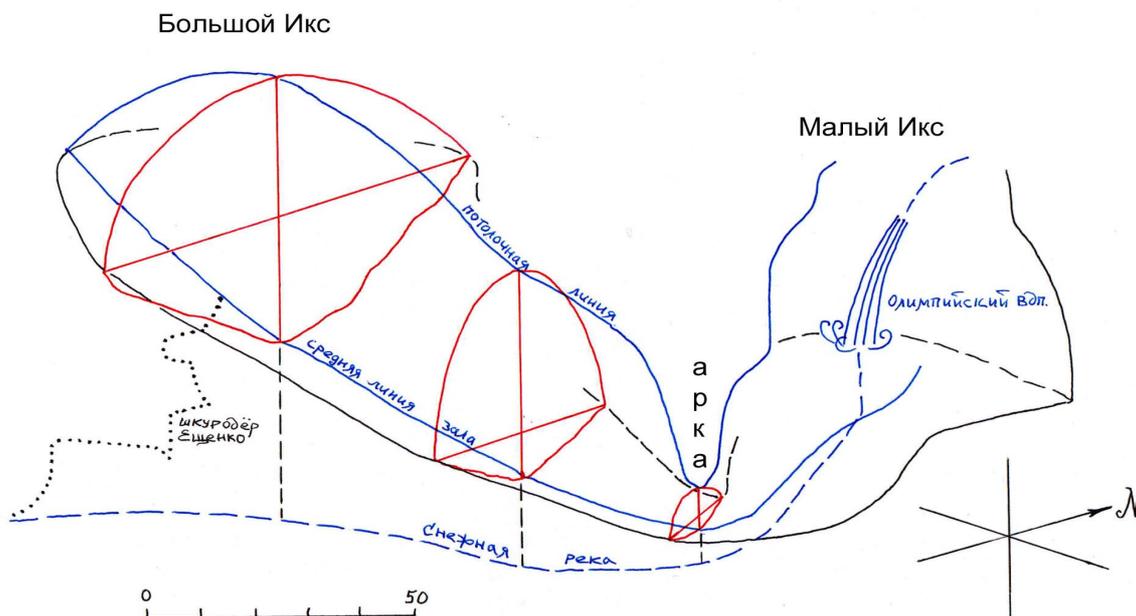


Рис. 14. Сечения зала Икса и их расположение относительно реки

Попутный вопрос: а точно ли мы видим максимальную ширину зала Икса? Или может быть максимальная ширина скрыта где-то ниже, под обломками? Взглянем на рис. 10Г и 10Д. Мы видим, что максимальная ширина зала всегда видна явно. Исключения редки и возможны при выпуклом характере обломочного пола, когда обломки сползают к краям зала. Примером такого исключения служит, например, Большой зал (п. Снежная). Но этот зал никак не является надрусловым обрушением и сформирован при активном участии Снежного Конуса. Это уже другие процессы (речь о которых ниже).

Сечения зала и проблема выноса вещества. Взглянув еще раз на рис. 10. мы можем сделать вывод, что коль скоро арки образуются при разрушении высоких каньонов, площадь поперечного сечения исходного каньона будет приблизительно равна площади сечения вновь образованного зала. С поправкой на некоторое разуплотнение обломочного материала. Но если мы видим, что обломочного материала явно недостаточно по сравнению с сечением, то ясно, что имеет место вынос обломков водотоком. Казалось бы, все просто? Обвалилось — унесло потоком. Но проблема выноса материала не решается тривиально. Было бы понятно, если бы весь дерупций (отложения обвалов) и десперсий (отложения осыпей) состояли бы сплошь из мелкой фракции. Тогда весь обвал уходил бы в реку до полного израсходования (как песок в песочных часах проваливается в нижнюю камеру полностью). Но в обвале есть и крупно-глыбовая фракция. Киньте в песочные часы хотя бы одну крупинку покрупнее и часы работать перестанут. Крупные обломки падают в русло, вымыванию они не подлежат, на них нагромождаются сверху все новые и новые обломки, проседание останавливается и дальнейшее вымывание блокируется. Река приносит обломки от залов, расположенных выше по течению. Они садятся на фронтальную часть завала. И вымывание блокируется не только вертикально в пределах данного завала, но блокируется и вообще перенос обломков вдоль водотока. Обломки не могут мигрировать дальше следующего вниз по течению завала. Куда же делся материал таких крупных залов как Большой Икс, Анфилада, Космос? Тут есть о чем подумать. Мы еще вернемся к этому вопросу.

Зал Малый Икс. Что касается Малого Икса (рис. 14), то его морфология радикально отличается от морфологии Большого Икса. Малый Икс своим происхождением связан с Олимпийским водопадом, сформировавшим этот зал. Тут тоже может быть арочный свод, но исходный профиль здесь вовсе не высокий каньон, поэтому и параметры зала тут другие. Залы при водопадах это особая категория. В Снежной мы не знаем ни одного примера, чтобы водопад падал в узком каньоне или колодце. Все

водопады падают обязательно в залы. Чем больше водопад, тем крупнее зал. Иркутский водопад падает в зал Соединения, Рекордный падает в крупный зал Усикова. Озерный водопад падает в зал с озером Алого Паруса. Олимпийский - в гигантский зал Малый Икс. И даже такие небольшие водопады как Мойдодыр и Котел падают в небольшие, но выраженные залы. Образование водопадов это отдельная тема, к которой мы еще вернемся.

Итак, мы уже узнали, что залы генетически бывают не менее, чем двух типов. На самом деле их больше. Поэтому самое время обдумать вопрос о классификации подземных залов.

Генетические типы подземных залов.

А-а. *Надрусловые залы обрушения.* Мы их уже рассмотрели выше. Расположены всегда над руслами крупных подземных водотоков, в поперечном руслу сечении имеют арочные своды. Высота от уровня реки чуть больше максимальной ширины. Для всех генетических типов залов мы будем приводить примеры из одной и той же пещерной системы Снежной. Надрусловые залы обрушения это залы Анфилады (три смежных зала), Надежды, Победы, Дольмена, Ожидания, Глиняный, Большой Икс, Тронный, Венский, Космос и зал над завалом Морозова-Козлова (на стыке п.п. Меженного и Снежной).

А-б. *Залы над отсадками.* По-сути, это разновидность предыдущего типа. Это тот случай, когда в русло проваливается сразу целый блок, пусть даже растресканный, но более-менее единый. Размеры его — десятки и даже первые сотни метров в поперечнике. Выпавший блок, как правило, имеет форму треугольной пирамиды и тогда потолок будет иметь соответствующую форму, повторяющую выпавшую пирамиду (рис. 15) с отчетливой трехгранной вершиной. Здесь как раз отличие от обычного арочного зала обрушения. Почему именно треугольная пирамида? По двум причинам. Во-первых, площадь отрыва должна быть минимальна. Просто из энергетических соображений. Поэтому сколы в виде правильных плоскостей самые выгодные. А именно три плоскости потому, что для выпадения блока нужно как раз минимум три плоскости. Хотя возможны и многогранные отсадки. А вторая причина в том, что отсадка может образовываться по уже существующим тектоническим



Рис. 15

зал в сместителе разлома

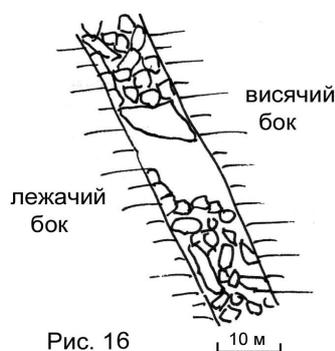


Рис. 16

разломам, особенно если таких разломов два и они пересекаются под неким углом. Геологические разломы всегда геометрически близки правильным плоскостям. Третья плоскость отрыва создается в момент выпадения отсадки. Два разлома плюс третья плоскость отрыва — вот вам и трехгранная пирамида. Причем, наклон всех трех плоскостей может быть разным. Если масштаб отсадки невелик, то треугольная пирамида в потолке так и сохранится. Если масштаб отсадки позволяет, то обрушение потолка продолжится уже до арочного профиля. Тогда в замке такой отсадки образуются залы с выпуклым полом, частью монолитным, частью обломочным. Прекрасный пример - залы над завалом Метрострой с идеальной трехгранной вершиной в районе ПБЛ-Метрострой.

Б. *Залы обрушения в сместителе тектонических разломов (рис. 16).* Здесь речь идет уже не о специфической пещерной тектонике обрушения, а о настоящих разломах в геологическом смысле. Бывают разломы локального масштаба, нередко даже разломы без смещения (диаклазы). По этим ослабленным зонам могут развиваться линейные русла водотоков, но сколько-нибудь значительные залы не образуются. Иное дело — крупные разломы. Такие разломы тянутся на многие километры,

нередко десятки километров, и имеют сместитель (поверхность смещения), близкий к правильной плоскости. Т. е., это структуры гораздо большего масштаба, чем пещерная тектоника. Изгибы этих плоскостей заметны в масштабах, явно превышающих размеры пещерных полостей. Крупный разлом имеет сместитель, заполненный обломочным материалом той или иной степени раздробления. Мощность (поперечное сечение) такого сместителя (зоны дробления) может достигать первых десятков метров, а в региональных разломах и больше. В поперечном сечении такой разлом состоит из двух монолитных блоков и пространства между ними, заполненного кластическим* (*раздробленным) материалом. Эту ослабленную зону пещеры могут использовать для дренажа воды, как вертикального (приходящие сверху притоки), так и субгоризонтального (подземные реки). Разлом перехватывает подземный водоток в качестве готовой водопроницаемой структуры.



Рис. 17а. Байпас. Разлом в полу хода. п. Снежная. Рис. 17б. ПБЛ-300 в сместителе разлома. п. Самохват

В крутопадающих разломах легко случаются обвалы с образованием средних размеров залов (рис. 16 и 17-б). Обычно это вытянутые в плане залы, где ширина задается мощностью сместителя, а длина может быть любая. Примеры не очень многочисленны. Хотя многие считают, что любой прямолинейный участок подземного русла непременно заложен в разломе, это чаще всего не так. Если прямолинейный ход действительно заложен по разлому, то пол и потолок у него никак не могут быть монолитными. Потолок редко доступен для изучения. Поэтому надо внимательно осматривать пол, чтобы не ошибиться. В случае крупного разлома, *русло перехваченной реки будет представлять из себя затопленный завал*, ограниченный с двух сторон параллельными монолитными стенами. В случае небольших разломов они будут видны как узкая щель, идущая вдоль русла. Но такое вы увидите крайне редко. В большинстве прямолинейных ходов пол окажется совершенно монолитным, что полностью исключает его тектоническую природу*. Найти настоящий разлом в пещере удастся не часто. Например, во всей системе Снежной мне известно лишь несколько мест, где видны несомненные разломы. Наиболее яркий пример это Байпас - ход параллельный основному руслу Снежной реки (рис. 16-а). Сразу несколько разломов можно увидеть в потолке зала Пенелопы. Но это все локальные разломы, возможно даже диаклазы. Настоящие крупные разломы видны в п. Самохват. Один из них прослежен на сотню метров по фронту, и на столько же по вертикали, и представляет из себя идеально ровную плоскость, наклоненную под 65 — 70 градусов. Другой разлом прослежен в том же Самохвате фрагментами на десятки метров. Мощность сместителя у обоих более 10 м. В сместителе одного из этих разломов находится зал ПБЛ-200, а в сместителе другого - ПБЛ-300 (рис. 17-б).

**Тогда как объяснить прямолинейность довольно длинных участков подземных русел? Причин может быть несколько. Назову для обдумывания одну. У нас есть идеальная наклонная плоскость. По какой траектории покатится пущенный по ней шарик? По правильной прямой. Бронирующий пласт это наклонная плоскость. Вода движется так же как шарик.*

В. Залы водопадов. Эти залы всегда ниже водопадов (водопады в них падают). Дно зала может

быть как завалено обломками с потолка, так и быть со свободным монолитным дном. В водобойной яме может быть озеро, но водобойной ямы может и не быть. Примеры: зал Соединения (Рис. 25, Иркутский вdp.), вdp. Мойдодыр, вdp. Котел, зал Усикова (вdp. Рекордный), вdp. Озерный (озеро Алого Паруса), Малый Икс (вdp. Олимпийский), Двух Братьев (вdp. Манящий).

Г. *Расширения русла.* Небольшие расширения русла могут образовывать некрупные гrotы и залы, вытянутые вдоль русла. При их образовании процессы обрушения либо не участвуют вовсе, либо играют подчиненную роль. Образуются при небольших миграциях русла вбок-вниз, или при слиянии двух этажей. Примеры: зал Юпитера, зал Пенелопы, Сахалинская галерея. Гремячий зал мы скорее отнесем к смешанному типу: частью это надрусловое обрушение, но упавшее не в рушащийся каньон, а в расширение русла. Нижняя по течению часть этого зала обвалом не затронута.

Д. *Залы под рушащимися колодцами.* Классический пример — Университетский зал в п. Снежная (рис. 18). Водопада здесь нет (разве что в паводки льет по колодцу). Так что это не зал при водопаде. Русло Водопадного ручья под Нулевым завалом (завал прямо под Университетским залом) не очень широкое. Поэтому зал никак нельзя причислить и к надрусловым обрушениям. Поэтому мы выделим

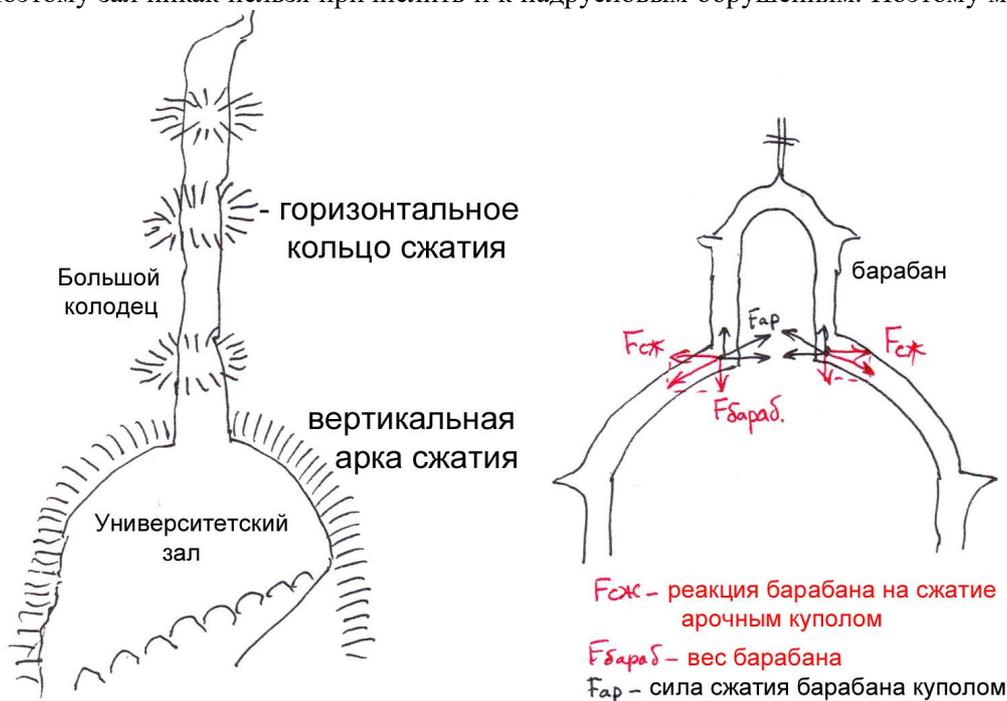


Рис. 18

новый тип зала. Морфологически Университетский зал это крупное расширение низа Большого колодца. Те, кто спускался по Большому колодцу помнят незабываемое ощущение, когда 165-м колодец достигает карниза и вы оказываетесь под потолком Университетского зала, вися в эффектной «бутылке». Большой колодец действительно один из крупнейших колодцев Снежной. В нижней части (но выше обрушения) его диаметр достигает 20 м. Связано ли обрушение колодца с его размерами? Или не всякий большой колодец непременно будет обрушаться? Может ли тем же способом рушиться небольшой колодец (любой колодец)? Попробуем выяснить.

Говорить о вертикальной арке сжатия, когда мы имеем дело с колодцем глубиной 165 м. нам не приходится. Если бы такая арка и существовала, то она имела бы в нижней части диаметр больше ста метров, а это гораздо больше, чем диаметр колодца. А любой колодец имеет устойчивую форму в поперечном сечении, близкую к овалу или кругу. Т. е. форма колодца контролируется не вертикальной аркой сжатия, а чем-то еще. Чем? Роль арки сжатия здесь играет горизонтальное сечение, которое имеет овальную или округлую форму. Это, так сказать, кольцо сжатия (по аналогии с аркой сжатия). Вообще из всех возможных сечений любой данной морфемы «несущей конструкцией» будет сечение с максимальной кривизной (= минимальными размерами). Поэтому мы считаем, что какие-то напряжения, которые могут быть описаны вертикальной аркой над колодцем могут существовать, но они играют подчиненную роль.

В залах руслового обрушения сечение с максимальной кривизной это обычно вертикальное поперечное к руслу сечение. Гораздо реже это будет вертикальное, но продольное сечение, как например на западном краю Большого Икса, где обрушение идет не только вбок от русла, но и вперед, вниз по течению вдоль русла (рис. 14). В колодцах «несущей конструкцией» всегда будет горизонтальное поперечное сечение. Поэтому колодцы редко имеют щелеобразную форму, они почти всегда округлого или овального сечения. Хотя если исходить из того, что все водотоки закладываются по диаклазам* (*- *разлом без смещения*), ослабленным прослоям, они должны бы быть щелеобразными. Однако же, щелеобразные колодцы это почти всегда очень маленькие колодцы. Что же заставляет заваливаться низ колодца, если он, как мы говорим, находится под нагрузкой кольцевых сжатий, и, следовательно, очень устойчив? По-видимому, здесь прочность кольца была снижена боковым ходом, вероятно даже это был высокий боковой ход. Кольцо сжатия разомкнулось. Ход стал заваливаться, выбивая опору из-под стен колодца. Ведь стены сжаты в горизонтальной плоскости, а вертикально вес стенок колодца не компенсирован опорой. Низ колодца стал заваливаться все выше и выше, пока образующийся зал не дорос до своей вертикальной арки сжатия. И эта арка сжатия вовсе не равна по высоте колодцу, она гораздо ниже его. В нее вписан не весь колодец, а лишь его нижняя «разомкнутая» часть. Нынешняя конструкция Университетского зала, вероятно, достигла устойчивости и дальше вверх Большой колодец сыпаться не будет. Если проводить аналогию с архитектурой, то мы имеем барабан, поставленный на арочный купол (рис. 18).

Барабан давит своим весом на арочный купол, вызывая сдавливание купола в *вертикальном* арочном профиле. Ответная реакция купола в том, что он сдавливает барабан, образуя в барабане уже *горизонтальное* кольцо сжатия. В целом получается устойчивая конструкция.

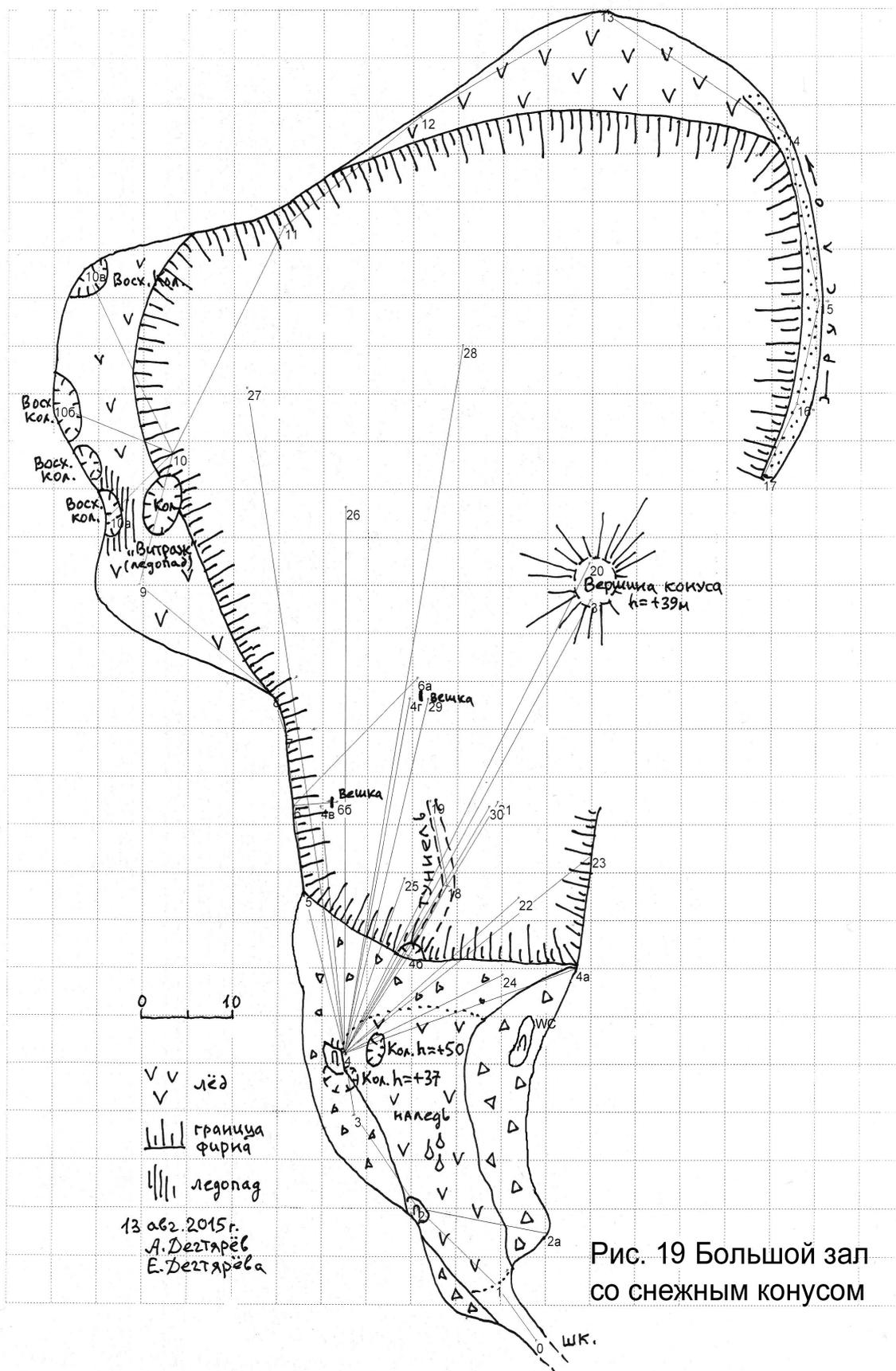
Е. *Залы нивального** происхождения. (*связанного со снегом, льдом) Кажется, во всей пещере остался только один зал, не попавший ни в одну из категорий. Я говорю о Большом зале Снежной (не путать с Большим колодцем). Его уникальная особенность — крупнейший подземный снежник высотой в разные годы от 25 до 55 м (рис. 19). Водотоков под залом нет. Приходящих сверху водотоков тоже, разве что хилая капель. Разломов нет (это видно в стенах зала). Есть приходящий сверху Кривой колодец, по которому снежный конус и пополняется лавинным снегом. Колодец не крупный. И надо заметить: не овальный в сечении. Это наклонная щель, шириной 3-4 метра. Может быть отнести этот зал к типу залов под рушащимися колодцами? Но тогда попробуем ответить на вопрос: куда рушится этот зал? Прямо под Университетским залом находится Нулевой завал мощностью метров 80, а под ним - Водопадный ручей. Ширина Университетского - 80-90 м. При высоте от верха зала до Водопадного ручья порядка 100 м. как раз получается классическая арка сжатия. Высота чуть больше ширины. Тут все сходится. Т. е. Университетский зал рушится в Водопадный ручей, который и утилизирует обломочный материал. Как и за сколько времени — другой вопрос. Но там есть обильный приток воды сверху и растворяющая способность этой воды. Под Снежным же Конусом ничего похожего нет. Рушиться ему некуда.

Под Снежный Конус с южного края можно пролезть метров на пятнадцать. Там есть продушина, отмеченная еще на карте 1972 года («туннель» на приведенном рисунке). Т. е. продушина там постоянная, мы ее наблюдаем уже полвека. Пол под Конусом обломочный. Конус стоит в полой воронке, через которую просачивается талая вода. Она, конечно, и растворяет известняк. Не забываем: талая вода практически дистиллированная, крайне агрессивная по отношению к известняку. Ее растворяющая способность может быть в несколько раз выше, чем у инфильтрационных вод, уже потерявших агрессивность при просачивании через эпикарст. Но! Она растворяет дно зала. А сверху на конус ничего не падает. За многие годы я не видел на снегу ни одного обломка. В ледяном ядре тоже осколков не встречается (это можно наблюдать, залезая в упомянутую продушину). Значит, зал растет не вверх, заваливанием потолка, а вниз, углублением пола.

Гипотеза выглядит рискованной. Но попробуем порассуждать. Допустим, снежный конус это молодое образование, использовавшее уже готовый зал. Но залу падать некуда, и растворить выпавший известняк кроме как талой (а значит - агрессивной) водой — нечем. Значит, зал не старше снежного конуса. Далее. Если Кривой колодец был бы глухим, без тока воздуха, то снег бы не таял и однажды забившийся снегом колодец развиваться бы не стал. А чтобы зал развивался, нужно постоянное подтаивание снега, а следовательно, воздухопоток между Кривым колодцем и Малым залом. Значит, некий изначальный ход там был до образования зала.

Третий очень важный момент. Высота Конуса все время меняется. В момент открытия в 1971 г. его высота была всего 25 м. Чтобы попасть на его вершину бросали лестницу 30 м. длины. Когда я

впервые попал в Снежную в 2005, высота снега была 50 — 55 м. и свободной вертикали не было вообще, из Кривого колодца мы выходили прямо на конус. Сейчас (2016) высота конуса примерно 40 м.



Но как бы не менялась высота конуса, площадь его основания неизменна. Меняется только наклон снежных склонов. Конус тает вершиной, а основание стабильно. И конус всегда примыкает к границе

«стенка-осыпь». Это важно. Снег мог бы заваливать арочный свод, мог бы отступать далеко на осыпной пол. Если бы это было случайным явлением. Но фокус в том, что осыпной пол всегда под снегом, а потолочные стенки всегда свободны. Это потому, что не зал диктует размеры Конуса, а Конус диктует площадь корродирования и, следовательно, размер зала. Да, в зале есть южный выступ, который Конус не затрагивает. Но в целом закономерность такая. Фактически это доказательство нивального происхождения зала.

Задача. Если вы поняли смысл первой главы, то сможете ответить на такой каверзный вопрос. Если мы посмотрим на глубокие каньоны поверхностных рек, то увидим, что совершенно вертикальные стенки каньонов имеют подчас высоту в сотни метров (рис.20). При этом они не рушатся, не заваливаются, не имеют крупных отрицательных уклонов, хотя это те же породы, слагающие карстовый массив - известняки, доломиты. В то же время на примере Снежной мы видим, что гораздо менее высокие стенки подземных каньонов массово заваливаются, превращаясь в залы с арочным профилем. Почему одни и те же породы ведут себя так по-разному? Не спешите, подумайте. Все, что нужно для ответа, вы уже знаете. Ответ будет дан в конце книги.



Рис.20. 300-метровые обрывы ущелья Дарай-дере (Кугитанг)

Часть 2. Подземные русла.

Поскольку данное сочинение по форме изложения относится к жанру научпоп (хотя и претендует на некоторую новизну идей), и, следовательно, имеет в виду круг читателей несколько более широкий, чем профессиональные карстологи, не будет зазорным объяснить пару элементарных понятий, без которых нам не обойтись.

Первое понятие это понятие о *базисе эрозии*. Рельеф речных сетей (и подземных речных сетей в частности) формируется в основном кинетической энергией текущей воды. Сейчас нас интересует именно *эрозия* - механический размыв твердых поверхностей. Растворяющую способность пока оставляем за скобками. Понятно, что чем больше уклон, тем с большей энергией происходит размыв поверхности и, следовательно, углубление русла. По мере того, как русло врезается, перепад высот между истоком и устьем водотока уменьшается, следовательно, уклон тоже становится меньше, а значит и энергия эрозии уменьшается. До какого предела происходит врезание русла? Пока уклон не станет нулевым. Тогда говорят, что *энергия рельефа* стала нулевой. Эрозия сменяется аккумуляцией (отложением наносов). Тот уровень, ниже которого долина реки не врезается, называется *базисом эрозии*. Физически это может быть уровень моря (если река впадает в море) или озеро, или другая крупная река (рис. 21). Изредка это бронирующий пласт, который река не может пропилить, даже при не нулевом уклоне. *Базис эрозии* может быть региональным (море) или местным (река в которую впадает наш водоток). *Базис* может повышаться или понижаться

(трансгрессии и регрессии моря, восходящие и нисходящие тектонические движения). Продольный профиль реки от истоков до устья, который вырабатывается в процессе деятельности реки называется *профилем равновесия*. В нижней точке профиль равновесия опирается на базис эрозии, а верхняя точка, это, очевидно, самые высокие точки водосбора. Обычно продольный профиль описывают экспонентой. Уклон русла монотонно убывает от истоков к нижней точке профиля. Базис эрозии является асимптотой снизу для профиля равновесия.

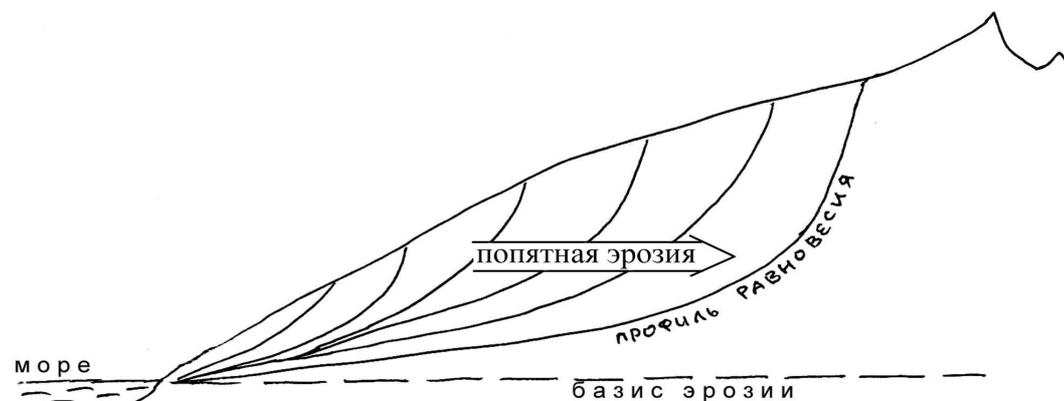


Рис. 21. Соотношение понятий “базис эрозии”, “профиль равновесия” и “попятная эрозия”

Попятная эрозия. Второе необходимое нам элементарное понятие - понятие о *попятной эрозии*. Наиболее ярко это видно на примере Ниагарского водопада, уступ которого отступает со скоростью порядка метра в год вверх по течению. Даже подсчитано, через 20 — 30 тыс. лет водопад, пятясь, достигнет озера Эри и вызовет гидрологическую катастрофу (озеро почти мгновенно сольется в образовавшийся прорыв). Тот же самый принцип действует при образовании оврагов: они возникают там, где энергия эрозии максимальна (либо в самой крутой точке склона, либо там, где концентрируется максимальный водный поток) и быстро удлиняется вверх по склону (при этом также и углубляясь и расширяясь). Т. е. длина оврага нарастает вверх по течению. Речные сети по сути ничем не отличаются от сетей овражных. Долины точно так же развиваются со стороны устья вверх по течению (рис. 21). Тот же самый принцип неоднократно пытались применить и к пещерам. Почему бы и нет: подземная речная сеть это такая же речная сеть, только с крышей?

Наиболее экзотическая гипотеза пещерообразования утверждает, что пещеры растут не от поверхности вниз, вглубь массива, а наоборот, снизу вверх, из глубины массива на поверхность (рис. 22). В подтверждение выдвигалось целых три довольно сильных аргумента. Первый: если мы считаем, что подземные полости это те же речные сети, только подземные, то у них должна проявляться попятная эрозия, как у наземных речных сетей. То, что наземная речная сеть именно так и развивается — факт несомненный.

Второй аргумент заключается в том наблюдении, что основные формы подземного рельефа имеют широкие основания и узкие верха. Например. Большинство колодцев на дне шире, чем в верхней части. В вертикальном сечении они чаще всего Δ -образные. Большинство русел в поперечном сечении более широкие, чем потолочная щель над этим же участком русла. Т. е. и они тоже имеют Δ -сечение. Да и вообще, чем глубже спускаешься в пещеру, тем более крупные формы наблюдаешь. Более крупные залы, более широкие русла и т. д. Что-то в этом наблюдении есть.

И третий, самый сильный аргумент. Входы в пещеры расположены так, как будто поверхностный рельеф никакого отношения к их образованию не имеет. Казалось бы, все пещеры должны начинаться на днищах карстовых долин, в днищах балок, крупных воронок. То есть, там, где на поверхности концентрируются водные потоки. А на деле многие известные пещеры начинаются узкими отверстиями на крутых склонах, а часто чуть ли не на вершинах гор (п.п. Напра, Иллюзия, Вулкан, Подутьюжная). В балках тоже встречаются пещеры, но как-то не чаще, чем на склонах и на вершинах. Это наблюдается и на Арабике, и на Бзыбском хребте, и на Караби. И если предположить, что пещеры растут изнутри наружу и выходят на поверхность случайным образом, то все объясняется.

Безусловно, гипотеза красивая. Хотя и не верная. Прежде всего, она находится в остром противоречии с тем твердо установленным фактом, что агрессивность (растворяющая способность) воды максимальна в почвенном слое и быстро теряется с глубиной.

Согласно данной гипотезе вода попадает вглубь массива по тектоническим трещинам, трещинам напластования и т. п. Но тогда получается, что вода проникает вглубь массива, не расходуя своей агрессивности. И интенсивное растворение почему-то начинается лишь в нижних частях карстовой водоносной системы. Почему так, гипотеза ответить не может.

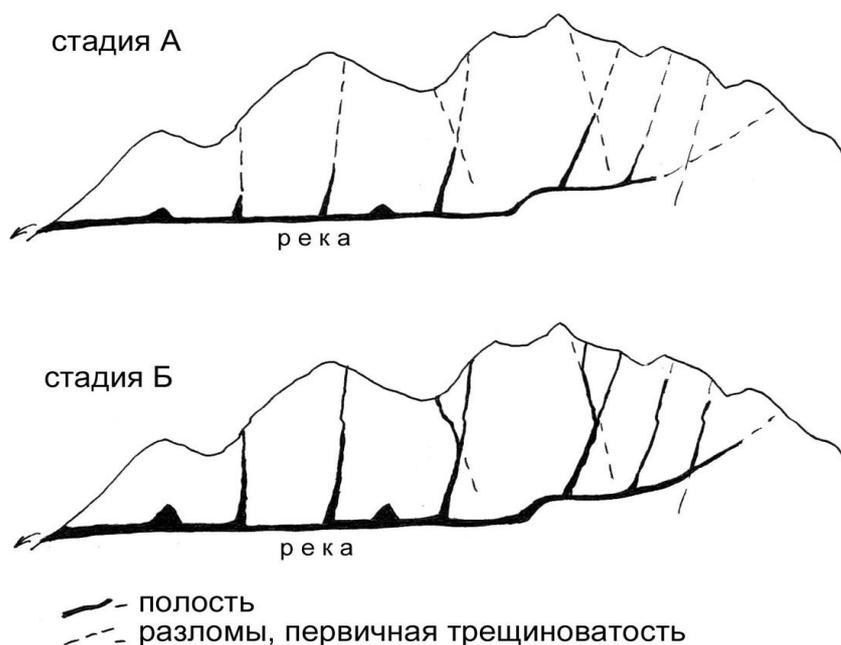


Рис.22 Развитие пещеры согласно гипотезе “прораствания полостей изнутри массива”

Что касается хаотичности расположения входов относительно рельефа поверхности, то это можно объяснить иначе. Наблюдаемые нами *полости старше, чем поверхностный рельеф*. Рельеф Арабики и Бзыби в основном ледниковый. И те входы в пещеры, которые мы видим - это случайный срез местности троговыми (ледниковыми) долинами двух-трех последних оледенений. И значит, рельеф существенно преобразился в течение последних 400-600 тыс. лет. Добавим к этому, что денудация (химическое растворение) поверхности массива дождевыми водами идет быстрее, чем эволюция пещер. Поэтому даже вне ледникового рельефа все пещеры, которые мы наблюдаем уже срезаны на сотни метров вместе с поверхностным слоем и мы никогда не видим изначального рельефа, соответствующего моменту зарождения пещер. На Караби, где ледникового рельефа, благодаря малой высоте, нет, денудация поверхности вполне объясняет «странное» расположение входов на вершинах холмов.

Что же касается более крупных форм именно в глубинах карстового массива, то это вообще объясняется тривиально. Чем глубже мы продвинемся в пещеру, тем больше притоков сольется в один, тем шире русло, тем крупнее надрусловые обвалы. Чистейшая статистика: чем глубже в пещеру спускаешься, тем больше водосбор у наблюдаемой нами точки.

Колодцы шире в своих днищах потому, что энергия падающей воды наверху колодца меньше, чем воды, пролетевшей несколько десятков метров, а площадь, накрываемая брызгами внизу колодца гораздо больше, чем наверху колодца... И т. д.

Не знаю, кто придумал эту интересную гипотезу. В письменном виде она, кажется, нигде не изложена. Я о ней услышал в устной беседе от В. Д. Резвана.

Гипотеза наводит на интересные размышления. Все-таки, есть попятная эрозия в подземных полостях или нет? Любой колодец это тот же уступ, иначе говоря водопад (действующий, или бывший, или периодически действующий). Водопады, как мы видели на примере Ниагарского водопада, все время отступают попятной эрозией. Следовательно, все уступы в пещере должны медленно двигаться вверх по течению, прорезая пещеру длинными узкими каньонами и постепенно понижая уровень русла. И так, пока не будет достигнут профиль равновесия, опирающийся на соответствующий базис эрозии. А региональный базис эрозии в случае южных хребтов Западного Кавказа и Крыма это - Черное море. А уровень Черного моря за последний миллион лет менялся не раз (несколько раз понижался на 200 — 300 метров в связи с открытием или закрытием перетока в Средиземное море через Босфор). Следовательно, любое понижение базиса эрозии влекло за собой

резкое увеличение скорости врезки как поверхностных, так и подземных долин. И если уровень моря останавливался надолго на какой-то отметке, то каждой такой остановке должна соответствовать серия пещер-источников по всему побережью с одинаковой гипсометрической высотой (в том числе и субмаринных источников на глубинах до 300 м. под современным уровнем моря). А в самих пещерах каждому резкому изменению базиса эрозии будет соответствовать образование нового этажа руслом подземной реки.

Я изложил современную общепринятую парадигму, разработанную у нас прежде всего В. Н. Дублянским. Теперь критически рассмотрим данную концепцию.

Чем вообще отличаются поверхностные и подземные речные сети? Или они идентичны? Различия между ними есть, и существенные. Если мы рассмотрим перпендикулярное к руслу сечение поверхностной реки, то оно всегда V- или U-образное. Долина р. Хипсты, несмотря на то, что река горная, имеет ширину от 1 до 6 км. У нее ярко выраженный V-образный профиль (рис. 23). А поперечный профиль для подземной реки будет всегда Δ-образным либо I-образным (рис. 13).



Рис.23. Профиль п. Снежной на фоне двух поперечных сечений долины р.Хипсты

Подземные каналы *никогда не растут вширь**. А почему? Что заставляет любую долину поверхностной реки увеличиваться не только в длину, но и вширь? Ответ такой: отсутствие кровли (в отличие от пещерных русел). Любая долина поверхностной реки имеет равномерное *площадное рассеянное питание сверху* (дождь, снег). А сеть подземной реки имеет *точечное* питание концентрированными притоками сверху. Еще на поверхности карстового массива, или на первых десятках метров в эпикарстовой зоне все осадки сливаются, и глубже, в вадозной зоне, перемещаются по подземным каналам в виде концентрированных субвертикальных потоков ограниченного сечения. Иначе говоря, подземные субгоризонтальные каналы принципиально отличаются от поверхностных долин *отсутствием склоновых процессов*. Склоны поверхностных долин активны благодаря: а) рассеянными осадкам, б) почвенным процессам, активирующим подпочвенное растворение карбоната, в) температурным колебаниям на поверхности, в частности



Рис.24. Зал с плоским потолком в Мамонтовой пещере (США)

морозному выветриванию, г) селевым, осыпным и обвальным процессам, связанным с предыдущими факторами. Чем активнее идут склоновые процессы, тем меньше общий уклон стенок долины в поперечном сечении и, соответственно, тем шире каньон (долина). В пещерах, где склоновые процессы представлены только обвальной активностью и точечной активностью приходящих сверху притоков, борта русел, как правило, вертикальны или даже имеют отрицательный наклон.

*Тут я, разумеется, не вполне прав.

Бывают случаи, когда вымывается ослабленный пласт, прикрытый сверху бронирующим потолочным пластом. В этом случае образуются залы и русла шириной до 50 и даже более метров. Такие залы имеют совершенно плоский потолок (Рис.24). Но это не боковая эрозия, это растворение. Обратите внимание: на полу зала нет значительных обвалных отложений. Пласт рыхлый, он дает мелкие обломки, которые из-за своей большой удельной площади поверхности быстро растворяются. Но в общем случае я говорю не о таких исключениях.

Второе важное отличие между поверхностными долинами и подземными каналами в том, что первые могут иметь неограниченную глубину. Нередки каньоны глубиной в сотни метров и даже больше километра (рис. 20, 23, 25). А подземные русла никогда не имеют высоких вертикальных

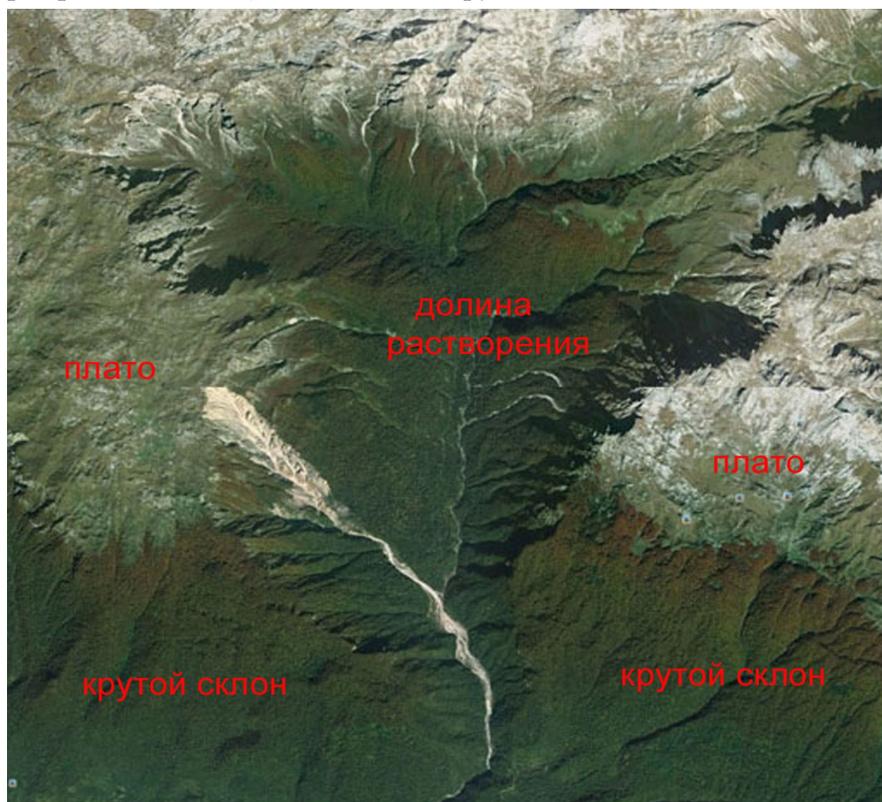


Рис.25. Долина р. Хипсты - типичная долина растворения.

сечений. Как правило, это первые десятки метров, изредка до ста или чуть более метров. Это предел их вертикального развития. При этом колодцы в тех же самых пещерах могут иметь неограниченную глубину. Известны колодцы до 640 м (п. Вртиглавица, Словения). Колодец в п. Абац (Абхазия) глубиной 410 м. Чтобы понять, в чем принципиальная разница между руслом и колодцем и между подземным и наземным руслом, надо понять принципиальную разницу в их образовании.

Поверхностная речная сеть (древовидная модель речной сети) всегда ложится пусть на изогнутую, но единую поверхность скатывания — рельеф данной местности. В процессе развития она линейно вдоль русел углубляет эту исходную поверхность. В случае подземной речной сети - все не так. Она изначально закладывается как трехмерная каркасная трещинная сеть. Подземные реки в такой сети могут протекать одна над другой, пересекаться, что немыслимо для рек поверхностных. Подземная река может течь снизу вверх, что опять же невозможно в реках поверхностных. В сифонных каналах это обычное явление. И это никого не удивляет, как не удивляет движение воды в домах вверх по водопроводным трубам.

Сифонные каналы под уровнем грунтовых вод — это понятно. А что мы скажем про так называемые «подвешенные сифоны», расположенные гораздо выше, на сотни метров выше поверхности грунтовых вод? Такие сифоны мы знаем в Напре, в Илюхинской, в Пантюхинской, в Крубера-Вороньей, и, разумеется, в Снежной. Т. е. это не уникальное явление, а многократно повторенное. Следовательно, и объяснение должно быть не уникальным, а общим. Во всех этих подвешенных сифонах потолок и пол монолитные, возможность образования путем обвала в таких случаях мы не рассматриваем. Поверхностная река не может иметь монолитное русло идущее то вверх, то вниз. Ну разве что водобойная яма под водопадом. Но перечисленные сифоны с водопадами не связаны. Единственным возможным объяснением будет признание того, что *все подвешенные*

сифоны это расширенные первичные трещины. Это те каналы, по которым вода мигрировала еще в трещинную стадию образования пещеры, только теперь они увеличены в сечении. И, как видим, на этих участках каналы за всю историю развития данного канала не переместились и не углубились далее, чем на диаметр их поперечного сечения. И, значит, попятная эрозия в этих местах гарантированно равна нулю. Мы могли бы назвать подвешенные сифоны реликтами трещинной стадии, но может оказаться так, что весьма значительный процент наблюдаемых нами пещерных каналов тоже являются реликтами. Можно обобщить, что любой линейный пещерный ход можно считать реликтом, если он имеет более-менее изометричное сечение и монолитные стены, дно, потолок. Иначе говоря, это те ходы, в которых нет следов значительного пропиливания русла вниз или вбок. Пропиленные каньоны, глубиной в несколько десятков метров - уже явная миграция русла вниз. Это пример не реликтов.

Водопады. Водопады нам интересны тем, что на их примере мы можем исследовать масштабы попятной эрозии. Для начала вспомним уже упомянутое наблюдение, что все многочисленные водопады Снежной (а это уже некая статистика) падают в залы или залообразные расширения русла (рис. 26). Мы помним, что залы при водопадах это отдельный генетический тип залов. Чем больше водопад, тем шире зал, в который он падает. У небольших уступов (до 4 — 5 м) расширения русла может и не быть (например, у водопада Руки-Ноги, являющегося двухметровым уступом).



Как видим из рис. 26, ширина зала при водопаде примерно в три-четыре раза превосходит ширину русла выше водопада. Ту же пропорцию мы видим у водопада Рекордного (падает в зал Усикова) и у водопада Озерного (падает в озеро Алого Паруса). Водопад Олимпийский падает в зал Малый Икс, который имеет размеры 100 на 90 м. Но этот зал осложнен обвалами, сильно расширившими зал, и поэтому для нашего анализа он не годится. Мы его рассматривать не будем.

На сколько отступил водопад с момента своего зарождения? Очевидно, что не более, чем на длину зала. Зал Соединения имеет длину 22 м. Как видим, цифра не очень впечатляющая. Примерно такую же длину имеет зал Усикова (Рекордный водопад), а озеро Алого Паруса (водопад Озерный) чуть меньше их обоих, порядка 15-17 м. Значит, попятная эрозия на Снежной реке проявляется в пределах 25 м. Это примерно тот же масштаб, что и высота каньонов на Снежной реке. И высота самих водопадов тоже ограничена тремя-четырьмя десятками метров. Тот же масштаб явления. И

поэтому мы можем сделать предположение, что в формировании водопадов собственно эрозия не играет значительной роли. И углубление русла и отступление водопада происходят благодаря только коррозии, т. е. химическому растворению. Углубление на вертикальных и горизонтальных участках идет с одной скоростью везде, где происходит смачивание породы водами реки. Поэтому высота каньонов близко совпадает с длиной (и высотой) залов при водопадах. Классический пример Ниагарского водопада с его ярко выраженной попятной эрозией сыграл для нас дурную роль в качестве ложного примера. Попытка представить пещерные водопады как его аналоги терпит фиаско. Пещерные водопады не относятся к эрозионному типу, они коррозионные. Отступление такого водопада идет с той же скоростью, что и углубление горизонтального русла. Это подтверждается отсутствием водобойных ям у таких крупных водопадов как водопад в зале Соединения, у Рекордного, у Олимпийского. Казалось бы: вся энергия падающего водопада прилагается к мизерной площадке. В этой точке должно быть максимальное проявление эрозии, если предполагать эрозию значительным фактором образования подземных русел. А водобойной ямы нет!

Эрозионные и коррозионные русла имеют во многом сходную морфологию, различить их не просто. И эрозия и коррозия действуют в пределах смачиваемого периметра русла. В результате и при эрозии и при коррозии образуются каньоны. Но в деталях эти русла все же отличаются. Одна из таких деталей — отсутствие водобойных ям под пещерными водопадами.

Не всегда, разумеется. Бывают водопады с водобойными ямами. Или псевдо-водобойными ямами. Они есть в виде озер у водопадов Котел, Предрекордный, Озерный. Но не исключено, что эти

водобойные ямы на самом деле продукт растворения, а не эрозии. И тогда они вовсе не водобойные, а псевдо-водобойные. Псевдо-водобойные ямы не такое уж редкое явление. Днища многих колодцев заполнены не очень глубокими лужами с довольно пологим блюдцеобразным дном. Их образование вполне логично: если уж на дне появилось хоть небольшое зеркало воды, дно под всей поверхностью воды будет растворяться. Это самоподдерживающийся процесс. В то же время любой переток (перелив) из этой лужи тоже будет углубляться тем же растворением и не даст луже стать глубже первых десятков сантиметров...

Отступление второе. Валуны, галька и песок. Еще одно важное отличие поверхностных долин от подземных вот какое. Прогуляемся вдоль русла поверхностной реки в карстовом районе. Например, по долине реки Хипсты. Это и методически более верно: и Снежная река и р. Хипста текут рядом, по одним и тем же породам, но первая из них — подземная, вторая — поверхностная. Но как они различаются! Русло Хипсты завалено сильно окатанными неподвижными глыбами от крупных обвалов, хорошо окатанными подвижными валунами, галькой всех размеров, промежутки между валунами забиты песком от крупно- до мелко-зернистого. В пойме обширные песчаные пляжи. Все фракции хорошо окатаны. Следовательно, здесь превалирует механическая эрозия. Теперь взглянем на каньон подземной Снежной реки. Преимущественно мы видим монолитное чистое дно и стены, в русле — крупные неподвижные глыбы без следов окатки. Валунная фракция отсутствует почти полностью. Галечная фракция отсутствует почти полностью. Крупнозернистый песок в русле присутствует изредка, в «теньях» течения. Мелкозернистая песчаная и глинистая фракции встречаются на более высоких этажах на высотах 20-100 м выше русла. Это понятно: эти фракции выпадают из практически стоячей мутной воды во время паводков. В русле тонкие фракции не отлагаются и уносятся в виде мути. Куда же делись галька и валуны? А они не делись: их и не было, они не образуются массово на Снежной реке. Почему? Склоновые процессы в долине Хипсты это постоянно действующий процесс, а на подземной реке — редко-эпизодический (обвалы). Допустим, произошел обвал на подземной реке, образовались разные фракции от песчаной до крупно-глыбовой. Если бы этот материал мог мигрировать на протяжении нескольких километров, то образовались бы и валуны, и галька, и окатанный песок. Совсем крупные глыбы остались бы на месте, но имели бы следы истирания проходящей галькой. На самом деле и глыбы (из которых могли бы образоваться валуны) и щебень (из него образуется галька) сразу, не успев окататься, отложатся на ближайшем русловом



Рис. 27. “Рога и копыта” в русле подземной реки, не совместимые с валунным переносом.

Крупнозернистый песок присутствует.

завале. Здесь они и останутся, пока не истают до размера песка благодаря химическому растворению. Эти фракции до конца своего существования остаются неокатанными. И лишь песчаная фракция просочится сквозь завал и будет вынесена из пещеры. Ну а раз нет постоянной поддерживающейся миграции вдоль русла валунной и галечной фракций, то нет и эрозии русла. Эрозия в сыпучих породах может осуществляться одной лишь водой, эрозия в скальных породах возможна только как истирание ложа галькой и валунами. *Вода без песка камень не точит.* А раз нет

эрозии, то в русле повсеместно можно встретить ажурные выступы, фигуры растворения (называемые в народе «рога и копыта»). Такие формы (рис. 27) не могут существовать на пути миграции валунов. Они несовместимы. Поэтому в руслах поверхностных рек «рога и копыта» никогда не встречаются.

Другой любопытный пример — Краснопещерная река в одноименной Красной пещере в Крыму. Здесь русло в десятке мест перегорожено крупными плотинами - гурами, через которые вода переливается (рис. 28). Нетрудно догадаться, что такие плотины также несовместимы с валунным, галечным, да и песчаным переносом. Так как они служили бы мощными ловушками на пути миграции песчаной и более крупных фракций. Но легко убедиться, что подпруженные гурами участки русла ничем не заполнены, дно за гурами практически пустое, монолитное. Значит, песчано-галечно-валунного переноса на Краснопещерной реке тоже нет.



Рис.28. Гуровая плотина на Краснопещерной реке. Над ней видна отмершая реликтовая плотина предыдущей генерации.

Попутно замечу, что на фотографии мы видим человека, сидящего на другой, более древней гуровой плотине. Характерное для оникса чередование белых и черных слоев под ногами сидящего выдает ее чисто натечное происхождение. Когда-то она была прорвана в основании, русло углубилось и начался рост новой гуровой плотины.

Подытоживаем. Подземные реки отличаются от поверхностных:

- трехмерной (а не двумерной) структурой на этапе заложения речной сети
- у поверхностных рек нет фреатического этапа развития, у подземных он есть всегда
- отсутствием масштабных склоновых процессов
- точечным (а не площадным) орошением приходящими сверху притоками
- I или Δ-образным, но не V- или U-образным сечением каньонов
- подавляющим преобладанием коррозии над эрозией
- отсутствием заметного галечного и валунного переноса вдоль русла
- запретом на боковую миграцию русел, невозможностью образования широких долин
- редуцированностью попятной эрозии

Вернемся к водопадам.

Вторая отличительная деталь подземных водопадов — обязательные залы при водопадах.

Почему образуются залы при водопадах, ведь падающая струя не очень широкая и, как это видно на примере всех перечисленных водопадов, не задевает боковые стены залов? И значит механическая эрозия боковых стенок зала здесь ни при чем. А у водопадов с озерами энергия падающей воды еще и гасится слоем воды в озерах (Озерный, Котел). Можно предположить, что все дело в брызгах. Особенно во время сильных паводков, которые длятся на Снежной реке 3,5-4 месяца (с середины марта по июнь). Мельчайшая водяная пыль. Стенки зала при водопаде отличаются от стенок горизонтальных частей русла (вдали от водопада) только тем, что первые смачиваются

брызгами, а вторые нет (ввиду отсутствия брызг).

Теперь давайте посмотрим, что случится с водопадом, если базис эрозии резко понизится, допустим, на сотню метров? Увеличится ли скорость врезания русла выше по течению от водопада? Не увеличится (рис. 29). Пусть базис понизился от уровня 1 до уровня 2. Водопад стал выше. Но повлияет ли это на профиль реки выше точки А? Нет. В точке А не будет никакого отклика на это событие. Информация в точку А о понижении дна водопада не доходит. И в вышележащей точке В

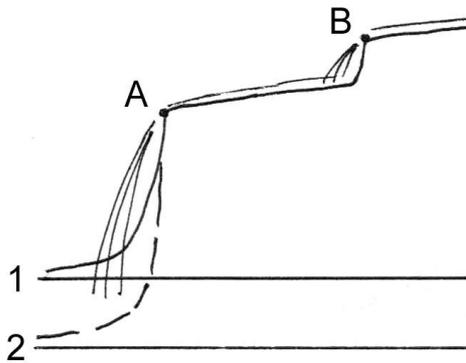


Рис.29. Понижение базиса эрозии не влияет на профиль пещерной реки

тем более отклика не будет. Он был бы, если бы высота водопада повлияла на скорость размыва верхней кромки и фронтальной стенки водопада. Он стал бы пятиться с большей скоростью, быстро достиг бы водопада В и т. д. То есть, профиль равновесия развивается не столько вертикальным углублением, сколько срезанием передней стенки уступа: уступы движутся вверх по долине волнами, один за другим. Примерно так же разрабатываются многоуровневые карьеры: экскаваторы, каждый на своем уступе, выбирают вертикальные стенки, а не пол уступа, по которому экскаватор только перемещается. Описанный эрозионный механизм работает лишь для сыпучих, глинистых, трещиноватых пород. Для скальных — нет. Как было продекларировано выше, передняя стенка уступа водопада не размывается, а растворяется, а для этого процесса безразлична высота

водопада. Если же речь идет о скальных, но не карбонатных породах, то долины поверхностных рек в таких породах углубляются равномерно вниз, водопады здесь встречаются, но скорость их попятного движения ничтожна.

В этом принципиальная разница между дезинтегрированными породами (песок, глина, сильно-трещиноватые породы) и монолитной скальной породой. И тогда рушится вся парадигма, на которую опирается В. Н. Дублянский. Даже сам термин «эрозионный врез русла» становится некорректным, поскольку нет самой эрозии. По смыслу должен быть термин «коррозионный врез русла». Но в гидрологии такой термин отсутствует.

На самом деле пещерные русловые системы углубляются не столько врезанием дна, сколько *переключением дренажа на более низкие этажи*.

Этажность пещер. Это еще одно очень важное понятие, без которого мы не поймем, как образуются пещеры. Идея этажности не нова. Русскоязычному читателю она известна в основном в виде классического примера пещеры Красная в Крыму, где В. Н. Дублянский выделил в привходовой части целых шесть этажей. Позже, в 2003 году в той же пещере, в привходовой части прокопали самый нижний этаж, соединяющий Красную с Грифоном. И этажей стало семь. Причем, нумеровались они снизу вверх, как этажи в доме (как мы увидим ниже, это абсурд). И предполагалось (возможно, что и неявно), что все эти этажи прорезались сверху вниз сквозными меандрами. Возможно, что не все авторы настаивали именно на прорезании. Ведь этажи в явном виде не находились одни под другими. Достаточно было взглянуть на горизонтальный план пещеры и это становилось ясным. Но поскольку роль эрозии в карстологии рассматривалась либо как

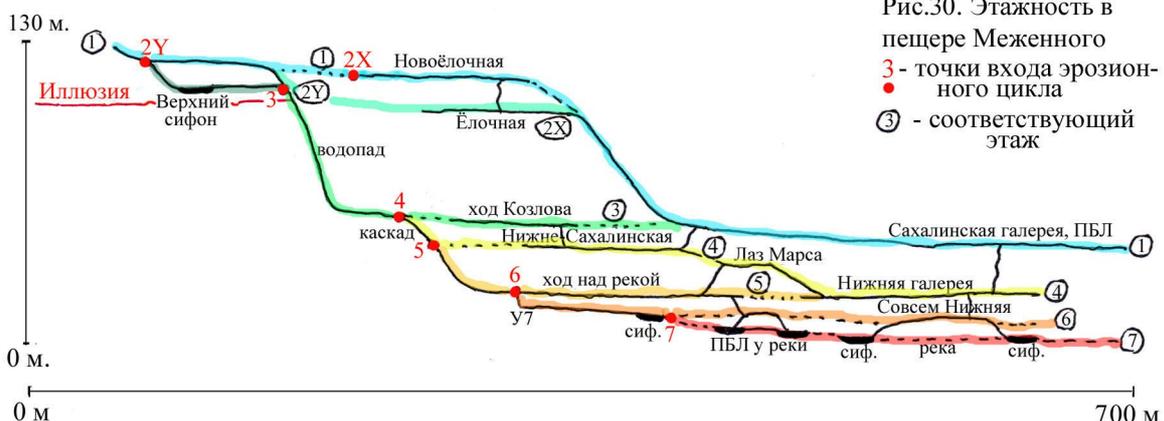


Рис.30. Этажность в пещере Меженного
 3 - точки входа эрозионного цикла
 ③ - соответствующий этаж

доминирующая, либо как значительная, наравне с коррозией, то такой взгляд был вполне логичен. Раз есть эрозия, то прорезаются. На самом же деле этажи не прорезаются между собой, они *переключаются*.

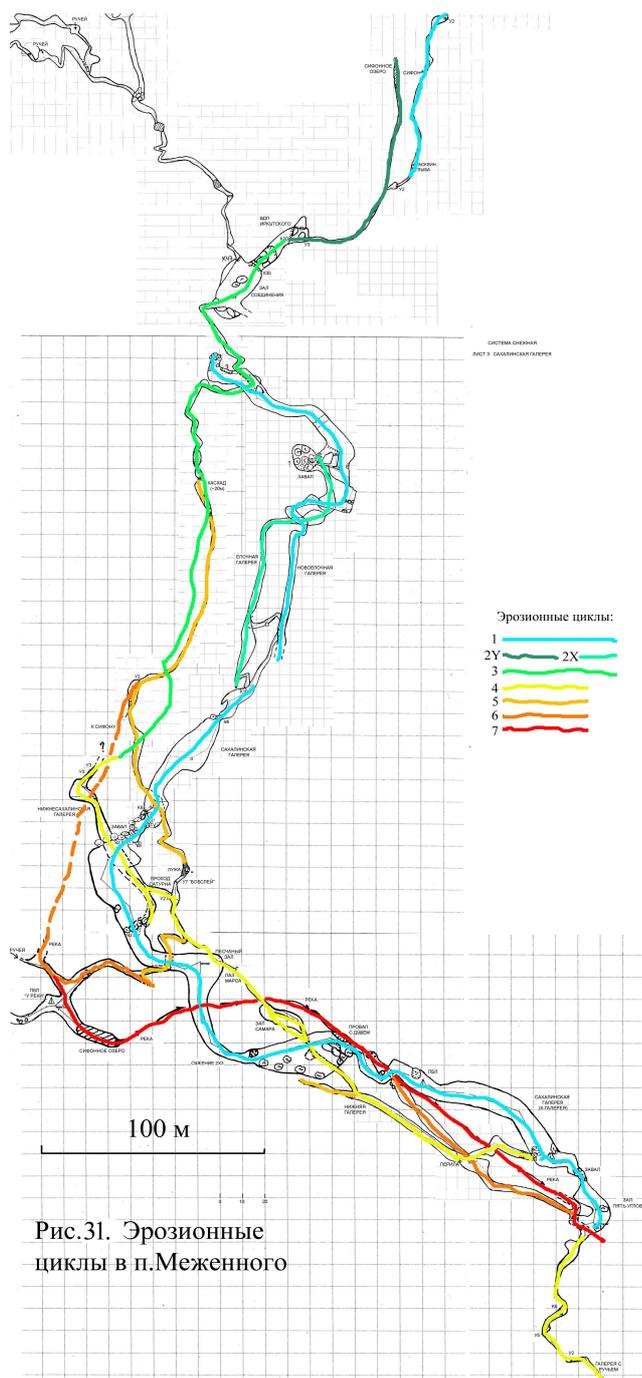


Рис.31. Эрозионные циклы в п.Меженного

Взглянем на разрез и план субгоризонтальной части пещеры им. Меженного (рис. 30 и 31). Мы выбрали этот кусок пещеры по двум причинам: он детально исследован и в нем этажность выражена очень хорошо. Семь циклов врезания (до пяти в одном поперечном сечении). Наиболее древний первый (верхний) этаж (врез) показан голубым цветом. Далее этажи последовательно переключались на все более низкие уровни, один за другим. На плане пещеры (рис. 31) хорошо видно, что этажи не находятся один под другим, что исключает сквозное прорезание. Каждый новый цикл врезания проявлялся не на всей длине реки, а лишь на отдельных участках. На разрезе красными точками показаны точки входа эрозионных циклов (некорректный в данном случае термин «эрозионный» мы употребляем лишь в силу традиции). Каждый новый врез имеет соединение с предыдущими лишь в двух точках: входа и выхода для этого цикла. Понятно, что и нумерация этих циклов будет от самого раннего до наиболее позднего, т. е. сверху вниз.

Если мы возьмем современное действующее русло, по которому ныне течет вода, то мы увидим, что абсурдно считать его седьмым этажом (равно как и первым). Разные участки этого русла относятся к разным циклам врезания и имеют разный возраст (рис. 30). Поэтому надо быть предельно внимательными и помнить, что нумеруются не сами этажи, а коррозионные циклы, создавшие эти этажи. А термин «этаж» имеет скорее прикладное бытовое значение.

До какого предела мы будем находить все более высокие пещерные этажи? Искать их до самой поверхности нет смысла. Формирование этажности начинается не от поверхности массива. Верхние этажи (они же первые по времени образования) закладываются сразу на значительной глубине. Как это происходит мы увидим чуть ниже на схеме. Сюда же примыкает

и другой вопрос: есть ли каналы *под* ныне действующими руслами подземных рек? Подрусловые каналы у поверхностных рек известны, хотя встречаются не часто. Например, они могут сформироваться у рек, текущих по известнякам или (особенно) по гипсам. У подземных рек такие каналы вполне могут существовать даже как типичное явление, хотя они и недоступны для непосредственного наблюдения. Ниже мы опишем, как они образуются.

Кстати, заметим, что этажность в Снежной существует только над основным водотоком. Ни над одним из притоков этажность не известна.

Стадии образования карстовой системы. Представим себе карстовый массив на ранних стадиях развития. Это так называемая «трещинная стадия». Развитых каналов еще нет, все каналы являются, по сути дела, первичными трещинами массива. На рис. 32 представлена равномерная система трещин. Поскольку гидростатическое сопротивление первичных трещин приблизительно

одинаковое, пути дренажа 1, 2 и 3 между точками А и В вроде бы равнозначны. Но так будет лишь в том случае, если точка А находится под гидростатическим давлением. Если это не так (например, если она находится близ поверхности массива или на поверхности грунтовых вод), то путь 1 не будет реализован вовсе, путь 2 с трудом, а путь 3 будет преимущественным. Это так, поскольку на горизонтальном участке пути 1 гидростатическое давление равно нулю и по этому пути вода не пойдет.

Горизонтальные перетоки вод возможны лишь тогда, когда на горизонтальном участке имеется большой перепад гидростатического давления. Допустим (для пути 3), если точка В это вклюдз, а

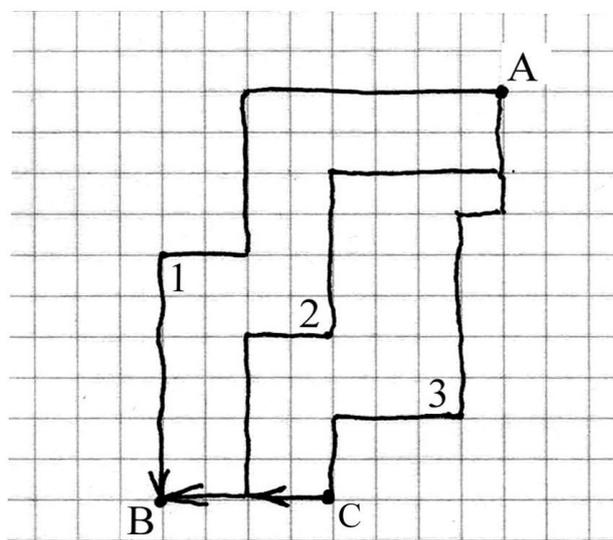


Рис.32. Равномерная система трещин в карстовом массиве

точка С находится под гидростатическим давлением. Все это объясняет тот тривиальный факт, что верхние части пещерных систем всегда вертикальны. А если мы видим горизонтальный ход в кровле массива, то это следует объяснять значительным эрозионным понижением местности или неглубоким заложением всей карстовой гидросистемы.

Но вернемся к трещинной стадии. Преимущественного развития каких-то каналов из множества наличных еще нет. Суммарный объем всей совокупности трещин еще очень невелик, дренаж через массив идет очень медленно, и как следствие этих двух причин все каналы полностью заполнены водой. Таким образом, весь массив почти до самой кровли являет собой трехмерную среду трещинных фреатических* (*заполненных водой) каналов. В начальных стадиях спелеогенеза все эти трещины участвуют в дренаже массива, но развитие (расширение растворением) получают лишь те трещины, по которым дренаж идет чуть

быстрее (надо учитывать и агрессивность вод, которая быстро убывает от поверхности внутрь массива). Равномерная трехмерная сетка трещин постепенно превращается в объемно-древовидную структуру (не путать с плоской древовидной сетью подземных и поверхностных рек). Здесь все еще возможно протекание действующих каналов один под другим, разветвление потока на параллельные участки и т. п. Все, как это было и в трещинной стадии. Но суть в том, что появляются *каналы преимущественного развития*.

Расширение такого канала автоматически означает уменьшение гидростатического сопротивление на этом канале. Он становится каналом сверхпроводимости. Конкурирующие каналы, не получившие развития, после этого почти не увеличивают свое сечение, хотя пока они находятся под зеркалом грунтовых вод и по ним все еще медленно движется вода. Когда развитые каналы позволяют воде из массива сливаться быстро, уровень грунтовых вод понижается, каналы выше него

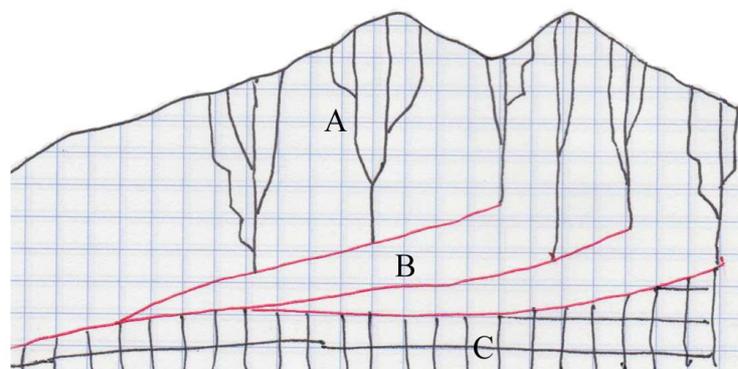


Рис.33. А- трехмерная древовидная сеть каналов вадозной зоны.
 В - двумерная древовидная подземная речная сеть на границе зон.
 С - трехмерная сеть первичных трещин фреатической зоны.

осушаются и большая их часть навсегда остаётся в зачаточном состоянии. Эта часть массива переходит в *вадозную* стадию развития. Иначе говоря, это среда периодически увлажняющихся каналов. Уровень грунтовых вод для приходящей сверху воды аналогичен поверхностному рельефу, по поверхности которого она и скатывается. На этом уровне развивается плоско-древовидная подземная речная сеть (рис. 33, «В»). Это субгоризонтальная часть пещер. И трехмерная первичная сетка и объемно-древовидная и плоско-древовидная сети могут сосуществовать. Трехмерная сеть при этом остается под уровнем грунтовых вод (рис. 33 «С»), плоско-древовидная сеть это граница фреатической и водозной зон («В»), а объемно-древовидная сеть выше этой границы («А»).

Теперь посмотрим, как образуются новые «эрозионные» врезки на подземной реке (рис. 34). Понятно, что образовались они из той системы трещин, которая существует под уровнем грунтовых вод. Но перепад гидростатического давления на участке BGA невелик, а на участке DEC он больше. Поэтому и проработка подруслового канала здесь будет идти с разной скоростью. Чем меньше уклон поверхности грунтовых вод (меньше гидростатический перепад в каналах), тем слабее фреатический переток, вплоть до почти полной остановки. При малых уклонах карстовые воды стекают только по поверхности грунтовых.

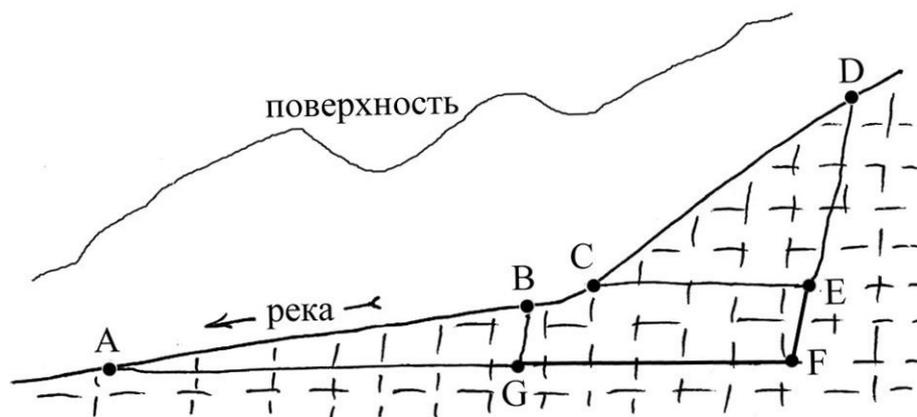


Рис.34. Образование эрозионных врезов в русле подземной реки.

На рис. 34 наиболее быстрая проработка будет, очевидно, на участке DEC. Поэтому *образование врезок происходит в первую очередь на участках с большим уклоном подземного русла* (если считать, что русло и задает уровень грунтовых вод). Соответственно, и выход подруслового канала в виде грифонов надо ожидать на участках со значительным набором глубины. Однако, на рис. 30 мы видим, что врезки, срезающие крутые участки русла, это врезки под номерами 2 и 3. Врезки 4, 5, 6 и 7 случились на участках с небольшими уклонами русла. На рис. 34 можно понять, почему так произошло. После образования врезки DEC перепад давлений между E и A невелик, но этот канал (EFGA) начал прорабатываться одновременно с каналом DEC, когда точка E находилась под гидростатическим давлением участка DE. Этажи (врезки) 4, 5, 6 и 7 (рис. 30) это бывшие подруслового каналы. Они стали доступны наблюдениям лишь тогда, когда осушились, превратившись в новые нижние «этажи». До осушки мы можем догадаться о существовании таких каналов по внутripещерным грифонам (восходящим источникам). Такие объекты известны в пещерах Напра (два грифона), Илюхинская, Снежная (например, ряд сифонов на субгоризонтальном участке п. Меженного). Осушенные грифоны мы встречаем в виде наклонных или вертикальных проработанных каналов, соединяющих два этажа. Причем, по мелкой морфологии стенок можно понять, что вода по такому каналу двигалась снизу вверх.

Попробуем укрупнить масштаб рассмотрения до размеров карстового массива и взглянуть на процесс формирования этажности во времени (рис. 35). Этажами мы, разумеется, называем только субгоризонтальные коллекторы. Поэтому на данном рисунке вертикальные трещины, а также развитые колодцы поздних стадий не показаны.

Первая, самая ранняя стадия (колонка I) это исходная сеть трещин по всему вертикальному профилю, никакого преимущественного развития каких-либо трещин еще нет. Профили трещин — плоские, в разных направлениях (рис.36-1).

Стадия II: трещины по-прежнему полностью заполнены водой, которая их уже начала прорабатывать. Поперечное сечение от трещинного до трещинно-фреатического — уплощенного эллипса.

		поверхность									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	
1	∧ T	∧ T	∧ T	∧ T	∧ T	∧ T	∧ T	∧ T	∧ T	∧ T	
2	∧ T	∧ T	∧ T	∧ T	∧ T	∧ T	∧ T	∧ T	∧ T	∧ T	
3	∧ T	∧ T	● тф	○ тф							
4	∧ T	∧ T	● тф	● ф	○ ф	○ ф	○ ф	○ ф	○ ф	○ ф	
5	∧ T	∧ T	● тф	● ф	○ фр						
6	∧ T	∧ T	● тф	● ф	● ф	● фр	○ р	○ р	○ ор	○ ор	
7	∧ T	∧ T	● тф	● тф	● ф	● ф	● ф	○ фр	○ р	○ р	
8	∧ T	∧ T	● тф	● тф	● тф	● ф	● ф	● ф	● ф	● ф	
9	∧ T	∧ T	● тф	● ф	● ф	● ф					
10	∧ T	∧ T	● тф								

Рис.35. Стадии формирования этажности пещеры из первичной системы трещин. Красное - уровень грунтовых вод. Арабские цифры - высотные уровни. Профили коллекторов: т - трещинного типа, тф - трещинно-фреатического, ф - фреатического, фр - фреатическо-руслового, р - руслового, ор - обвально-руслового. — сформированные пещерные этажи.

Стадия III: уровень грунтовых вод понизился настолько, что первые два верхних уровня осушились. Возможно их развитие застынет на этой стадии, возможно они будут поглощены эпикарстовой зоной и исчезнут. Под уровнем грунтовых вод каналы прорабатываются еще сильнее, приобретая чечевицеобразное сечение.

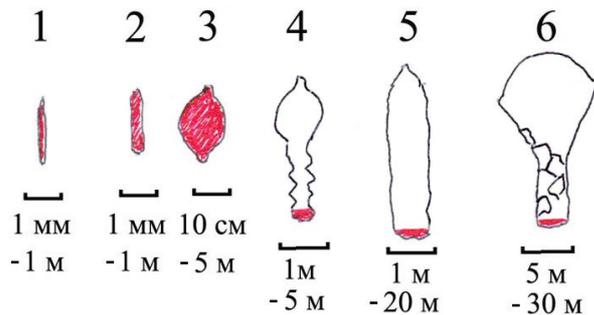


Рис.36. Профили коллекторов: 1 - трещинной, 2 - трещинно-фреатической, 3 - фреатической, 4 - фреатическо-руслевой, 5 - русловой, 6 - обвально-руслевой стадий развития.

Красное - заполненность водой.

Указаны ориентировочные диапазоны масштабов.

Стадия IV интересна тем, что под уровнем грунтовых вод выделяются каналы преимущественного развития. Все они находятся вблизи уровня грунтовых вод. Появляется явление сверхпроводимости в этих каналах, они быстро наращивают свое сечение, близкое кругу или овалу (фреатический тип сечения, рис. 36-3). Более глубокие каналы замедляют свое развитие, а совсем глубокие и вовсе его останавливают.

Стадия V: впервые появляются коллекторы со свободной водной поверхностью. Они начинают развиваться по законам речных русел, постепенно меняя профиль от чисто фреатического к смешанному фреатическо-руслевому (рис. 36-4). Это профиль типа «замочная скважина». Некоторые из таких каналов по габаритам проходимы для

человека. Как видим, этот первый и пока единственный полноценный этаж сформирован довольно глубоко под дневной поверхностью массива. Каналы более низких уровней (в пределах нескольких десятков метров от него) медленно, но развиваются.

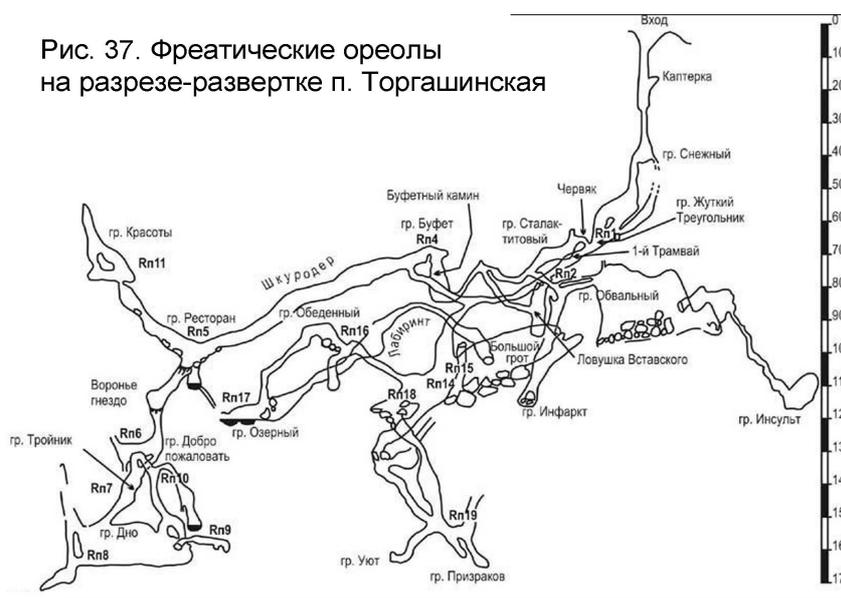
Стадия VI: более низкий этаж (уровень 6) развился настолько, что осушил этаж на пятом уровне. Теперь мы имеем уже два этажа. Верхний еще какое-то время активизируется во время паводков, но постепенно превращается в реликт. Теперь медленно начинает развиваться канал 7-го уровня, составляя конкуренцию этажу 6 уровня. При этом русло на 6 уровне развивается гораздо быстрее, чем канал 7 уровня, но это его не спасет: преимущество нижнего канала не в сечении, а в том, что он нижний. На его развитие может уйти много времени, за это время этаж 6 уровня может достичь гигантских сечений. При этом могут иметь место обвалы, тогда сечение будет иметь обвально-руслевой облик (рис. 36-6). Но рано или поздно этот этаж так же, как и более верхние, навсегда превратится в реликт.

Стадии VIII-IX-X: процесс формирования этажей продолжается. Мы видим уже три

полноценных этажа из которых верхние два уже реликты. В итоге мы получаем вот какой вертикальный профиль. Верхние два этажа застыли на трещинной стадии. Иначе говоря: *в кровле карстового массива горизонтальных русловых каналов быть не должно*. Углубляясь на уровни 3-4, мы видим постепенно усиливающуюся проработку трещин до полноценных фреатических каналов в стадии их полного осушения. В пещерных системах это самые верхние ореолы ходов, состоящие из хаотически расположенных небольших лазов, узких вертикальных, наклонных, горизонтальных каналов, небольших колодчиков и уступов. Настоящих русловых субгоризонтальных структур здесь нет. Меандрирующих (синусоидальных) структур тоже нет. Меандрирование во фреатической стадии невозможно. Для этого нужна текущая вода со свободной поверхностью.

Указанные хаотические структуры могут перебиваться более поздними колодцами в произвольных местах. Ходы, идущие то вверх, то вниз, часто вызывают недоумение: если это русла водотоков, то как же по ним текла вода? То вверх, то вниз? Удовлетворительный ответ получается только если предположить фреатические условия образования таких ходов. В качестве примера можно привести разрез п. Торгашинская близ Красноярска (рис. 37). За исключением более позднего каскада входных и нескольких внутренних колодцев, остальные ходы надо признать фреатическими.

Рис. 37. Фреатические ореолы на разрезе-развертке п. Торгашинская



Других примеров подобных ореолов можно привести много: п. Большая Орешная почти вся является фреатическим ореолом, п. Кап-Кутан (Туркменистан) почти полностью. В Снежной таких ореолов на сегодняшний день известно не много в донной части: это сложная система галерей над залом Пенелопы: Сибирская галерея и множество ходов вокруг нее. Кое-где этот клубок ходов прорезан более поздними вертикальными колодцами.

Фреатический ореол может быть и плоским лабиринтом. Хороший пример — система ходов с Подвешенным озером над Байпасом в Снежной (рис. 38, 39). На фотографии хорошо видно, что каналы заложены по субгоризонтальной трещине напластования. Поэтому вся эта лабиринтовая система находится в одной плоскости, наклоненной под 6° . На дне хода виден зачаточный меандр, успевший образоваться в процессе постепенного ухода воды и превращения каналов в реликт.

Горизонтальные лабиринтовые пещеры как в гипсах (Подолія), так и в известняках (Ботовская, Мамонтова) тоже целиком фреатические. Это тоже горизонтальные лабиринты, но механизм образования у них совершенно другой. Во-первых, у таких лабиринтовых пещер все полости заключены в одном пласте. Он всегда зажат между двумя некарстующимися, но водопроницаемыми пластами (например, песчаником), поэтому «хаотичность» ходов выражена только в плоскости этого пласта*. И, во-вторых, у лабиринтовых пещер этот фреатический этаж единственный. Поэтому и рассматривать такой тип пещер нужно отдельно.

*Эту ценную идею высказал и развивал А. Климчук. Подробное её описание ищите в его работах.

Спускаясь на уровни 5 и 6 (возвращаясь к рис. 35) мы видим уже полноценные этажи, причем самый верхний этаж имеет наименьшее сечение. Все эти этажи мертвые. А вот активный 7 этаж вовсе не обязательно будет иметь большое сечение. Это зависит от той стадии, в которой мы его застали. Если он вошел в русловую стадию недавно, то может быть заполнен водой почти под потолок. В

средней стадии своего развития он углубится и будет каньоном с текущей по дну рекой.

На поздних этапах развития этажа, в его «предсмертных» стадиях река местами исчезает, обвалы обильны. Могут формироваться залы (залообразование может начаться и раньше, на средних стадиях развития). Еще более низкий уровень 8 это активный подрусловой переток в стадии предшествующей возникновению нового этажа. А самые низкие 9 и 10 уровни застыли в своем развитии еще на трещинно-фреатической стадии. Но в отличие от самых верхних двух этажей (которые тоже трещинно-фреатические), их история не закончена, они еще смогут активироваться в дальнейшем.



Рис.38. Фреатическо-русловой канал, заложенный по горизонтальной трещине напластования. Галереи над Байпасом.



Рис. 39. Верхний фреатический этаж (красный цвет) над районом Байпаса.

Отступление третья. Активность поверхностей. Еще одно важное понятие. Активность — это скорость отступления морфологической поверхности. Посмотрим это на примере

внутреннего колодца. Это единый объект, сформированный разными морфологическими поверхностями: отдельно боковыми стенками и донной поверхностью. Эти две поверхности различаются главным образом своей активностью. Активность дна принципиально выше активности боковых стенок. Это так, поскольку активность стен обусловлена временем контакта со стекающей водой, а активность дна обусловлена непрерывным контактом со стоячей водой.

Типичное дно колодца — плоская блюдцеобразная поверхность с резким линейным контактом с боковыми стенами. Резкая линейная граница будет находиться в ассоциации с почти обязательной лужей и переливом из лужи в меандр (рис. 40). Перелив в меандр выше нижней точки дна на несколько десятков сантиметров, что и обеспечивает существование лужи по всей или значительной площади дна. Углубление дна идет примерно с той же скоростью, что и углубление перелива. Если перелив обгоняет углубление дна, то лужа сливается, дно перестает быть плоским, граница между стенами и дном стирается, колодец в районе дна сужается и переходит в меандр мелкими ступенями или наклонным каналом. Но и в этом случае время контакта вода-порода статистически больше, чем для стенок. Т. е., активность дна все равно будет выше. Это и понятно: падающая вода может миновать стены колодца без контакта, но мимо дна она никак не проскочит. Причем, вероятность контакта нарастает при падении воды от верха колодца до дна. Поэтому общий вертикальный профиль небольших (до 40 — 50 м) колодцев всегда Δ -видный.



Рис.40. Образование и разрушение донной лужи в колодце

←←← концентрированные потоки воды

↘ наиболее активное отступление геоморфологических поверхностей

Если колодцы очень глубокие (более 50 метров), то можно говорить о том, что ширина колодца с какого-то момента становится постоянной до самого дна, исключая верхние несколько десятков метров. Так происходит потому, что падающий поток полностью разбивается на брызги и равномерно стекает по всему периметру боковых стен. Бывают и обратные примеры. Автор наблюдал паводок в Большом колодце п. Снежной (165 м. вертикали). Причем, столб воды падал в Университетский зал, практически не касаясь стенок до самого дна. Но в межень активность стенок Большого колодца с разных сторон не одинакова. Очевидно, что со стороны уступов (со стороны подводящего воду Предколодца) она будет выше. Минимальна она будет на противоположном от уступов конце. Соответственно, колодец должен медленно прорезаться в сторону, откуда приходит вода. Но за всю свою историю колодец расширился по своей длинной горизонтальной оси не более, чем на 15 - 20 м.

Любопытно, что в колодце есть два крупных уступа. На глубинах 60 и 108 м. От верха 165-метрового Большого колодца. Оба, что характерно, со стороны Предколодца. Причем, нет оснований считать уступы реликтами. Вполне вероятно, что уступы не деградируют, а как раз наоборот, развиваются. Верхний уступ еще небольшой, в стадии формирования, его ширина метр-полтора. А нижний развился настолько, что даже имеет свою лужу с собственным переливом, аналогичным вышеописанным донным переливам колодцев. Целую серию аналогичных, довольно широких (5 - 7 м) плоских уступов с уже слитыми лужами можно увидеть на Ядерных Каскадах в Иллюзии (одна из ветвей Снежной). Несколько не слитых луж — в той же Иллюзии на глубинах 150 — 250 м. Т. е. мы имеем дело с довольно обычной формой рельефа.

У подземного речного русла активность дна также значительно выше активности стенок (кроме случая брызгового расширения русла при водопадах). Разница с колодцами только в симметрии. Симметрия колодца это симметрия конуса, а симметрия русла это симметрия вертикальной плоскости, пересеченной с понижающейся горизонтальной поверхностью. Разница в активности

стенок и дна русла видна из соотношения высоты и ширины каньона. Как правило, за все время своего развития стенки ушли друг от друга на несколько, обычно менее 10 метров, а дно углубилось на несколько десятков метров. Разница на пол-порядка — порядок.

Часть 3. Микрорельеф подземных ландшафтов.

Принцип леденца и принцип антиледенца. Вспомните, как в детстве вы сосали леденец на палочке. Или вы бросили кубики льда в стакан «Мартини». Как тает лед? Первыми растворяются (или тают) выступающие части (рис. 41-а). Точно так же угловатый обломок породы обтачивается рекой до идеально овальной гальки. Это принцип леденца. Вроде бы тривиально. Но тот же леденец можно лизать по-разному. Можно добиться, что леденец будет иметь довольно острые края. Лед тоже тает очень по-разному. На рис.41-б мы видим обратную картину: здесь медленнее всего тают как раз выступающие части. Назовем такое поведение принципом «антиледенца». Вот таяние ледника (рис.41-в). Обратите внимание на сходство острых пиков горной гряды и тающих ледяных сераков. Это сходство не случайно: в основе морфологии и тех и других лежит один и тот же принцип. А вот пример «антиледенца» уже из карстологии: поверхностные карры с остро заточенными кромками (рис. 41- г, д, е).

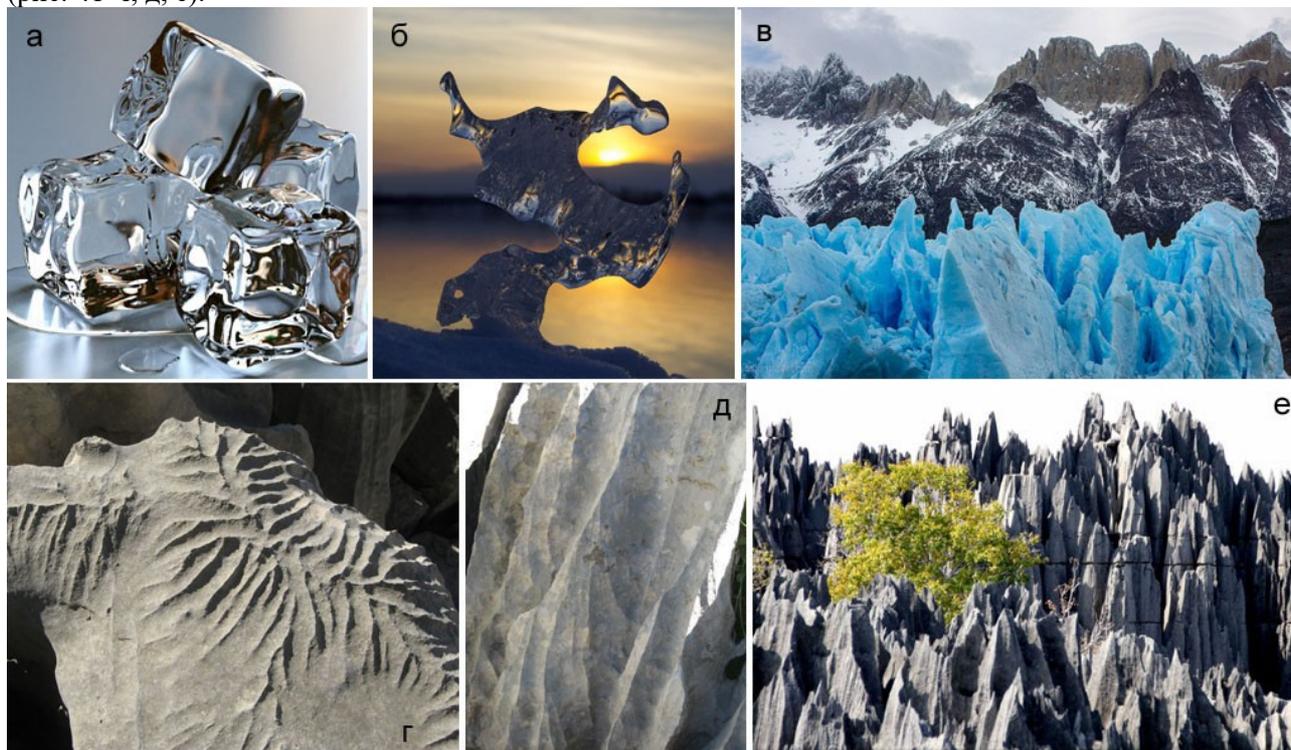


Рис.41. «Принцип леденца» (а) и «антиледенца» (б-е). г-д-е: зарождение и развитие остных кромок вертикальных перообразных карров.

В чем же разница? Лед в обоих случаях тает от соприкосновения с теплым воздухом или водой. Вроде бы должен быть один и тот же результат. Но результат противоположный. Разница очень тонкая и она заключается в *симметрии среды*. Понятие о симметрии среды — очень мощный инструмент, активно применяемый в минералогии и кристаллографии. По этой теме есть очень компетентная работа В. Мальцева «Как растет каменный цветок?» Рекомендую к прочтению.

Среда тающего в бокале кубика льда — субаквальная среда с симметрией сферы. Симметрия сферы или шара означает равнозначность всех направлений. В этой среде нет понятия верх-низ, не проявляется действие силы тяжести. Не проявляется направленность потока (воду считаем неподвижной). Как будет таять кубик в такой среде? По чисто статистическим соображениям вершины будут таять быстрее, так как к ним будет несколько лучше поступать тепло от окружающей жидкости. Тающий кубик будет постепенно принимать близкую к сфере форму.

Второй аналогичный пример: кусок гальки, кувыврающийся в потоке реки. Поток вроде бы направленный, но галька вращается и получает удары равномерно со всех сторон. Естественно, стёсываются в первую очередь выступающие части. Симметрия такой среды — снова сфера. Растворение игольчатых кристаллов — тоже происходит на самых выступающих вершинках. То же самое. Но вот на картинке 41-б таяние идет вроде бы в воздушной среде с той же симметрией сферы.

Но тут включаются другие механизмы. Таяние идет уже не столько от теплообмена с воздухом, сколько от теплообмена с пленкой талой воды на поверхности льда. И это радикально меняет дело. Вода имеет большую теплопроводность, чем воздух или лед. Пленка имеет разную толщину: близ ребер она минимальна, в середине «граней» пленка максимальна. Это следует из законов смачивания. Если жидкость не смачивает поверхность, то мы увидим обратное соотношение: капли будут собираться на выступах рельефа. Пример: капли росы не смачивают шубку спящей в пещере летучей мыши и роса остается на кончиках волосков. Но вода прекрасно смачивает лед. Соответственно, растворение в середине поверхности идет интенсивнее, чем на «ребрах». Но и это еще не все. Пленки, кроме того, еще подчиняются силам гравитации. Они медленно сползают вниз. И потому симметрия пленок это конус.

Симметрия конуса это когда все «горизонтальные» направления равнозначны, но действуют «вертикально» направленные факторы. Вертикальная ось тут не просто выделенная ось, а ось с направлением. Направление задает сила тяжести. Если «вертикальная» ось выделенная, но не направленная, то получим симметрию цилиндра.

Симметрия цилиндра это когда все «горизонтальные оси» равнозначны, а перпендикулярная к ним ось выделенная, но не направленная. Пример: вода в водопроводных трубах из которой выпадает накипь. Причем трубы могут идти хоть вверх, хоть вниз, хоть вбок, «горизонтальные» оси могут быть и не горизонтальны, но должны быть «перпендикулярны» выделенной «длинной» оси трубы. Длинная ось трубы это не геометрическая прямая, она может изгибаться вместе с трубами, менять направления. Это, еще раз повторюсь, симметрия среды, а не геометрическая симметрия. При этом труба может иметь не круглое сечение, а квадратное, треугольное, сплюснутое, какое угодно. Все равно в терминах среды это будет симметрия цилиндра. Симметрия цилиндра означает, что накипь в трубах будет отлагаться равномерно по всему периметру сечения и равномерно вдоль трубы. То, что по трубе вода течет в одну сторону, еще не делает эту ось направленной. Таковой ее можно считать, если направленность потока отразится на процессе осаждения накипи: если жесткость раствора будет изменяться по мере движения по трубе и в начале трубы слой накипи будет толще, чем в конце. Тогда мы назовем это «симметрией конуса», причем конуса не вертикального.

Симметрия поверхностных пленок, медленно стекающих вниз - это симметрия вертикального конуса. Но внутри пленки есть своя двумерная самоорганизация, сильно усложняющая понятие симметрии такой среды.

К чему приводит самоорганизация лучше видно на следующем примере (рис. 41 -г, д, е, рис. 42).

Как видим на серии фотографий, перообразные карры (их еще называют «желобковые карры») изначально зарождаются на практически горизонтальной поверхности (рис.41-г). Развиваются они

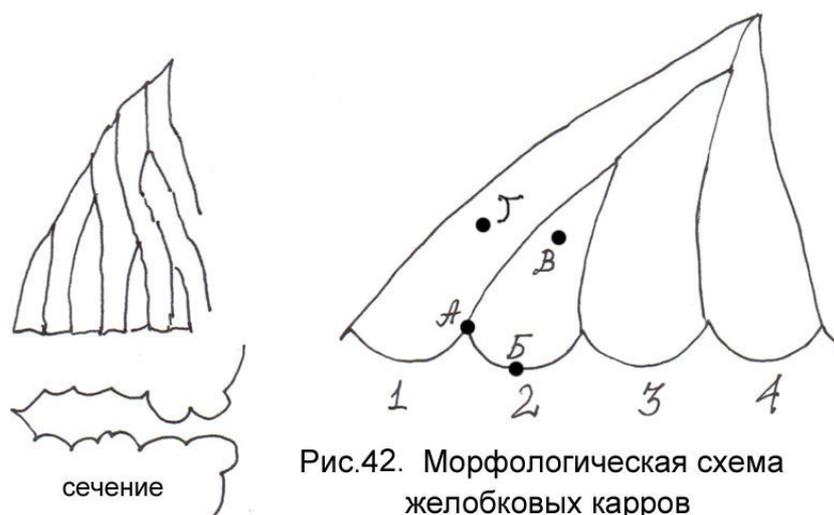


Рис.42. Морфологическая схема желобковых карров

лучше на вертикальных поверхностях. Причем, сверху вниз развитие усиливается. Постепенно боковые стенки скалы съедают толщу камня все сильнее, пока от верхней горизонтальной поверхности не останется лишь острый гребень. Объяснение тут чисто статистическое. Ясно, что растворение происходит дождевой водой. Пусть увлажнение сверху совершенно равномерное, вертикальное. Малейшее случайное углубление в скале тут же получит статистически преимущественное развитие.

Смотрим рис. 42. Точку «А» вода увлажняет только при прямом попадании капли в эту точку.

Точка «Б» увлажняется всем водосборным сегментом между двумя ребрами. Точка «В» имеет меньший водосбор, чем точка «Б». Она и углубляется медленнее. Точка «Г» имеет больший водосбор, чем точка «В». Поэтому можно спрогнозировать, что ложбины 1 и 3 постепенно полностью съедят ложбину 2. Теперь можно сформулировать «принцип антиледенца»: скорость растворения (таяния) ребер наименьшая, срединных областей поверхности — максимальная. Попутно замечу, что сеть ребер имеет обратно-древовидный рисунок (рис. 42, слева сверху). Он не аналогичен древовидной речной сети. Речная сеть стремится укрупняться и укрупняется, пока вся вода водосбора не окажется в одной единственной артерии. Здесь мы видим, что хотя часть желобков в конкурентной борьбе уничтожается, конечной конфигурацией будет все же их параллельная череда.

Подобные карры встречаются и внутри пещер. Вертикальные перья с аналогичными описанным бороздами часто встречаются в достаточно для этого глубоких колодцах. Для их появления нужно рассеянное орошение, аналогичное дождю. Оно как раз и возможно в колодцах при разбрызгивании потока о стены. Такие вертикальные перья не редкость.

Как видим, симметрия среды в водяной пленке очень сложна да еще и подвержена самоорганизации. Здесь проявляется уже не симметрия конуса, а более сложная структура. Поэтому образующаяся поверхность не сводится к простой единичной форме, как она сводится у окатанной гальки.

Почему скальные пики (рис. 41-в) имеют острую форму? По той же причине. Основной механизм разрушения не карстующихся скальных пород — морозобойное выветривание. Для него нужна вода, затекающая в трещины. Чем ближе к гребню, тем меньше статистическая возможность увлажнения. Вода банально стекает вниз. Вершинные части лучше прогреваются солнцем, сушатся ветром. Есть и другие рельефо-формирующие факторы. Ледниковое выпаживание - не менее важный фактор образования поверхности горных гряд. И очевидно, что на гребнях ледников нет, или они мелкие (каровые* ледники). (*каровые, с одной буквой «р» - микроледники в привершинных кулуарах). У подножия, на ложе ледникового цирка действие ледникового выпаживания максимально (рис. 43), на гребне — минимально или даже равно нулю.

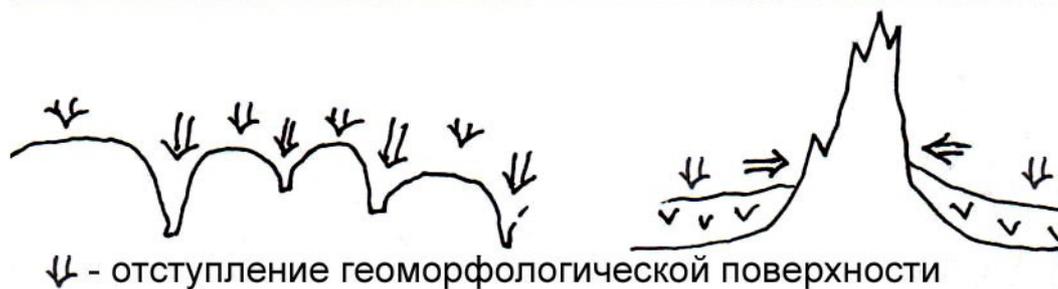


Рис.43. Принцип леденца (Кугитанг) и антиледенца (Анды) при формировании горной поверхности и их общая схема.

Горный рельеф, как и тающий лед, может формироваться по принципу антиледенца, а может по принципу леденца. Пример на рис. 43 слева — типичный карстовый массив (Кугитанг, Туркменистан). Подчеркнуто сглаженные вершины говорят нам о том, что здесь первыми сносятся выступающие части кромок каньонов. При этом среда не сферическая, а вертикально-коническая. *Сферическая среда гарантированно даст принцип леденца, а коническая — по-разному, возможно проявление принципов как леденца, так и антиледенца, в зависимости от самоорганизации поверхностных процессов.*

Самое главное, что мы должны были уяснить из вышесказанного, это что симметрия среды отражается в симметрии формирующихся эрозионных поверхностей. В случае, если мы не знаем, в каких условиях образовалась поверхность, мы можем «вычислить» симметрию образовавшей ее среды и сделать выводы о том, что это была за среда. Покажем это на нескольких нетривиальных примерах.

Мармиты, сфероидные поверхности («каменные сыры»), купола растворения. На рис. 44 изображены три сходных морфологически, по симметрии, но совершенно разных по генезису объекта: мармит, потолочный сфероид — купол растворения, и стенные сфероидные поверхности растворения, иногда называемые «каменным сыром». Самый простой объект из трех — мармит, он же исполинов котел. Его генезис беспорен: вращающаяся в потоке воды галька крутится в случайном первичном углублении, постепенно высверливая котел. Для его зарождения нужен устойчивый водяной водоворот (рис. 45).



Рис.44. А - мармит, Б - потолочные сфероиды,
В - поверхности растворения в стенах пещерного хода

Сама галька в мармите постепенно истирается до песка, который уже имеет шанс покинуть ловушку с потоком воды. Котел ловит новую гальку из потока и «чертова мельница» снова начинает

работать. Когда котел станет достаточно глубоким, галька на дне перестает вращаться и развитие котла останавливается. Такие котлы известны как в пещерах, так и в ложах поверхностных рек (пример: Большой каньон в Крыму). И в руслах ручьев на поверхности ледников, где каменные моренные осколки сверлят котлы во льду. Все это не раз наблюдалось вживую. Двух мнений тут не существует. Какая симметрия среды в данном процессе? Конус, несмотря на субаквальные условия. Направленную вертикальную ось задает гравитация, которой подчиняется галька. Поэтому мармиты строго вертикальны, расположены исключительно в полу (в ложе). Мармиты, заложенные в боковых стенах или в потолке невозможны в принципе.

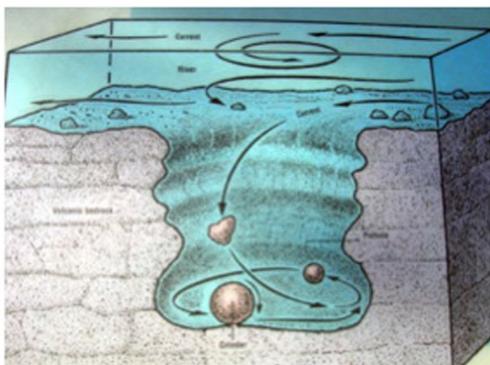
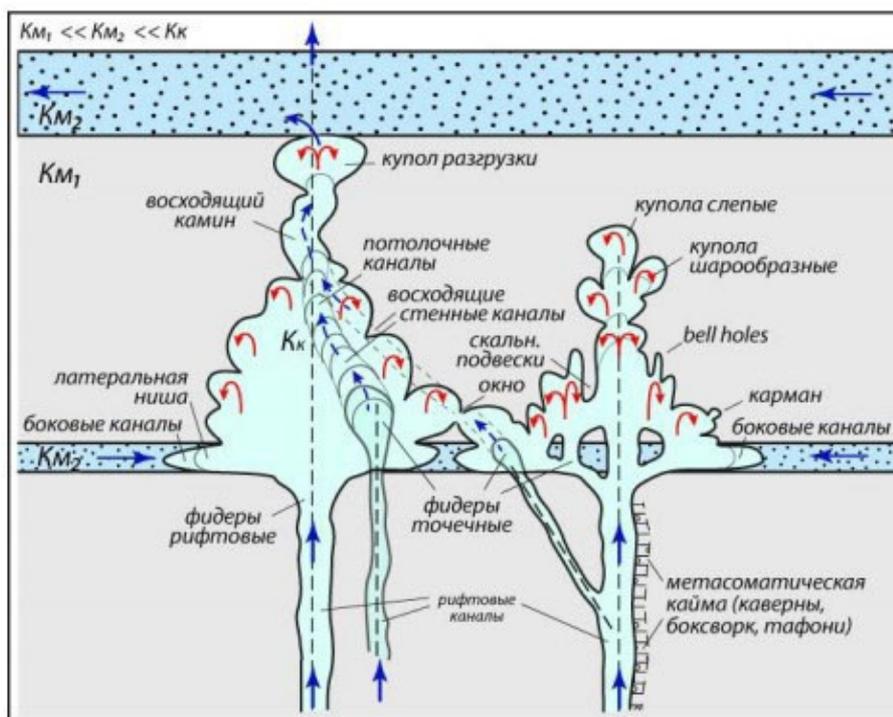


Рис. 45. Протачивание мармита галькой (рис. взят из интернета).

А вот с потолочными сферообразными куполами единого мнения нет. Даже наоборот, преобладает мнение, что это исключительно субаквальная форма, маркирующая

гипогенные (фреатические) условия образования данной пещеры (теория гипогенного спелеогенеза А. Климчука, см. рисунок из его книги (рис. 46)).



Типичная морфология гипогенных полостей в вертикальном поперечном сечении и номенклатура применяемых названий спелеоформ.

Рис.46.

Посмотрим, как это согласуется с симметрией среды? Не согласуется. Субаквальная среда в чистом виде имеет симметрию сферы. Симметрия сферы автоматически дает нам действующий принцип леденца. Тогда с чего бы на ровной скальной поверхности будет избирательно растворяться известняк, да еще в виде заглубленной сферы? Очевидно, что такой купол будет для потока воды мертвой, застойной зоной с пониженными темпами растворения. Красные стрелки на вышеприведенном рисунке — ошибочны. Вода так течь не станет. На рис. 44-Б дан пример сфероида (купола) со сквозным отверстием-каналом. Теоретически поток воды может идти сквозь этот сфероид. Но и тогда в соответствии с принципом леденца все сужения, пережимы между цепью сфероидов должны растворяться в первую очередь с образованием достаточно гладкой трубы. Так оно и есть в истинных фреатических каналах (пример на рис. 47 вверху).

Но есть множество примеров, когда точно такие же сфероиды «глухие», без сквозного

отверстия. Для них теория субаквального образования не работает совсем.



Рис.47. Фреатический канал в пещере Кек-Таш и воздушный канал в ложе ледника

Второе, бросающееся в глаза противоречие, — то, что такие купола растворения всегда вертикальны, всегда на потолке. В полу мы их могли бы перепутать с мармитами, но их нет и в боковых стенах, они не бывают горизонтальными. А это вопиющее противоречие с симметрией субаквальной среды, не делающей различия между верхом, низом и боковыми направлениями.

Наконец, третий аргумент «против». Допустим, у нас нет возможности наблюдать процесс образования куполов. Процесс столь медленный, что ни в гипогенных* (*под зеркалом грунтовых вод) условиях, ни в аэральных мы не можем надежно утверждать: это не реликт, процесс идет. Но у нас есть полный аналог субаквальной сферической среды — это таяние каналов в ледниках воздушным потоком. Чтобы понять, насколько процессы похожи, взглянем на две фотографии (рис. 47), где фигуры плавления льда совершенно аналогичны фигурам растворения известняка. Воздушный поток в глубинных каналах ледника это полный аналог фреатических условий в пещерах. Так вот: в подледниковых каналах полостей, аналогичных потолочным куполам нет. И взяты им неоткуда: они образуются из пленок с другой симметрией среды. Как они образуются на самом деле (согласно

нашей теории) можно понять из следующей схемы (рис. 48).

По нашему мнению, совершенно глухих куполов не бывает. Должна быть либо трещина, либо линейный канал, подводящий раствор. Он может быть очень маленьким, плохо заметным. Поступление раствора может быть ничтожным: капля в несколько минут — несколько десятков минут.

Формула растворения кальцита:



Это не простое растворение, типа растворения соли в воде. Это химическое растворение, зависящее от количества углекислоты в растворе. Если вода контактирует с атмосферой, то атмосферная CO_2 легко диффундирует в воду и обратно. Если в атмосфере, допустим, из-за процессов гниения в почве, увеличится количество углекислоты, она тут же диффундирует в воду и реакция сместится вправо, т. е. дополнительный известняк растворится до насыщения раствора. Если после этого вода куда-то утечет и там войдет в контакт с более бедной по CO_2 атмосферой, то равновесие сместится влево и выпадет избыток карбоната кальция. Так растут сталактиты на потолке пещеры. Дождевая вода прошла через почву, обогатилась CO_2 , в толще известняка насытилась карбонатом, по трещине вышла внутрь полости, где хорошая воздушная связь с внешней атмосферой. А во внешней атмосфере меньше углекислоты, чем в почвенной атмосфере. Равновесие сместилось в сторону пересыщения, выпал осадок, образовался натек.

Для образования куполов нужны обратные условия: в атмосфере пещеры должно быть повышенное содержание CO_2 . Обычно это бывает в плохо проветриваемых пещерах, где к тому же есть поступление органики, которая гниет. Вода, пока она движется по трещине, не растворяет ее, поскольку уже насыщена карбонатом. Трещина не расширяется. Но как только капля появилась на потолке и вступила в равновесие с пещерной атмосферой (богатой CO_2), она сразу же стала агрессивной по отношению к известняку. Сразу начнется растворение. Пусть получилось некое углубление в потолке. Какую форму примет это углубление? Из питающей трещины появилась капля. Эта капля движется по всей поверхности полости вниз, образуя кольцеобразный фронт сперва в позиции «а», потом «б», потом «в» (рис. 48). В какой из позиций растворяющая способность максимальна? В позиции «а» длина кольцевого фронта меньше, значит пленка толще, значит, растворение идет интенсивнее. В позиции «б» длина фронта больше, при этом она такая же, как в

позиции «в», но в позиции «б» пленка еще не насытилась карбонатом, а пока фронт дойдет до



Рис. 48. Образование потолочных куполов согласно теории растворения в водяных пленках.

позиции «в», агрессивность воды будет в значительной степени исчерпана. Может оказаться так, что входное отверстие («г») не будет расширяться, при этом внутри купол расширяется, раздуваясь в шар. Достигнув некоего критического размера, купол перестаёт раздуваться и в точке выхода питающего раствора зародится новый купол («купол в куполе»). Так вдоль трещины может образоваться целая гирлянда переходящих друг в друга сфероидов.

Купол по своему генезису это противоположность сталактиту. По гидрохимической обстановке это «анти-сталактит». И запомним важный побочный вывод: *интенсивность коррозии в не продуваемой пещере - выше.*

Симметрия купола растворения (симметрия конуса) соответствует симметрии водяных пленок. И соответствует принципу антиледенца. Выделенная ось среды здесь, во-первых, - гравитация, благодаря которой пленки движутся вниз. Гравитация вертикальна, поэтому купола образуются только в потолке. Есть и вторая выделенная ось - это разница в содержании CO_2 в атмосфере пещеры и в ее содержании в поступающем по трещине растворе. Раствор мог бы поступать и через боковую стену, но тогда не получится купол. Получится вертикальная борозда.

Но почему образуются сферы, сфероиды? В куполах преимущественное развитие получают участки с максимальной кривизной (и, конечно, те, что ближе к питающей трещине). Т. е. расширятся все мелкие каверны. Расширяются, пока не сливаются с соседями равной кривизны. А сфера как раз такая фигура, где кривизна максимально выравнена.

Назовем все вогнутые поверхности отрицательными, все выпуклые - положительными. Отрицательная, в своем максимальном развитии это внутренняя поверхность сферы, эллипсоида. Как не пересекай две сферы — их комбинация даст остро-заточенную догообразную границу. Что мы и видим на примере желобковых карров. Это визитная карточка принципа антиледенца. Положительная поверхность это уже внешняя поверхность того же шара, эллипсоида. Они при любой комбинации дают либо сглаженную, «не острую» границу, либо щелеобразную впадину как на рис. 43 внизу, слева. Это проявление принципа леденца.

Теперь вернемся к рисунку 44-в. К сфероидам растворения (так называемым «каменным сырам»). Что мы видим? Фрагменты сферических поверхностей, пересекающихся друг с другом под острыми углами. Не всегда, но часто заметна вертикальная и, притом, направленная ось симметрии. То есть, каким-то образом здесь задействована сила тяжести. Такие поверхности развиваются как на стенах, так и на полу. В последнем случае очень напоминают мармиты. Встречаются субгоризонтальные поверхности. На потолке тоже встречаются (рис. 49). На этом рисунке те же формы, что и на рис. 44-в, но в более сглаженном виде. Условия образования: достаточно увлажненные условия. Чаще всего находятся в руслах живых рек. В сухих частях встречаются как реликты. Возможно, на рис. 49 — реликты, но возможно, что там действуют конденсационные водные пленки.

Могут ли данные формы быть гипертрофированными мармитами? Однозначно, - нет. Функционировать как мармиты они не могут. Они все лишь фрагменты сферы, полной сферой на 360 градусов они принципиально быть не могут, поэтому галька в них вращаться не может, поэтому же

заполненные водой формы вам найти не удастся.



Рис. 49. Сфероиды растворения на стенах и потолке пещеры.

Могут ли такие формы образоваться в субаквальных условиях? Нет: симметрия среды у таких форм — вертикальный конус. Это субаэральная форма. Растворение в водных пленках, подверженных гравитации.

Вернемся еще раз к рис. 42. Там мы упоминали о том, что сегменты поверхности желобковых карров конкурируют между собой. То же и здесь. Сфероиды постепенно съедают своих соседей. Выживают, естественно, более крупные. Сферичность поверхностей, как и в случае вертикальных перообразных карров, достигается преимущественным развитием максимально удаленных от краев участков. В отличие от поверхности желобковых карров, у таких форм бывает слабонаклонное дно, но ровно настолько, чтобы в нем не оставалась стоячая вода. Какой здесь действует источник увлажнения — рассеянная капель сверху, брызги реки или конденсат — пока не ясно. Скорее всего, все-таки брызги реки.

А в чем различие потолочных куполов и сфероидов растворения? Различие одно: источник питания. У куполов — сочащийся из трещин раствор, у сфероидов — брызговое или конденсационное увлажнение. Вполне возможна комбинация, когда на потолке сформировался сфероид растворения и на него наложен купол.

Фреатические каналы. фасеточные формы растворения. Помню, как Владимир Аркадьевич Мальцев просто и совершенно неопровержимо доказал мне, что по полюму каналу внутри сталактита вода не течет. Я много раз видел своими глазами, как с кончика сталактита капает вода... Но. Если сломать сталактит, то новый сталактит на сломе зародится не как продолжение канала, а в нижней точке скола (рис. 50). Потрясающе. То, что мы так ясно видим своими глазами, оказывается неверным.

*«Движенья нет», - сказал мудрец брадатый.
Другой смолчал и стал пред ним ходить.
Сильнее бы не мог он возразить;
Хвалили все ответ замысловатый.
Но, господа, забавный случай сей
Другой пример на память мне приводит:
Ведь каждый день пред нами солнце ходит,
Однако ж прав упрямый Галилей!*

Рисунок 47, верхний и нижний: фасеточные (ячеистые) формы растворения. Думаю, каждый из вас слышал, что такие фасеточные (ячеистые) формы на стенах - наивернейший признак того, что данный ход фреатический. Они напоминают знаки ряби на песке, как эоловые, так и подводные. Мы можем зайти на речную отмель и наблюдать, как такие знаки ряби образуются под водой. Мы можем зайти в ледниковую пещеру (рис. 47 внизу) и наблюдать, как на наших глазах образуются ячейки таяния льда.



Рис. 50. Рост новых сталактитов на сломанном

И ход в п. Кек-Таш наверняка фреатический. Не верьте своим глазам. Я докажу, что эти фасеточные формы не могут быть фреатическими, они не образуются в субаквальных условиях. Итак, начинаем сеять зерна сомнения.

Если я скажу, что субаквальная среда без выделенных направлений предполагает сферичность среды и, следовательно, уничтожение выступов, а не их образование, вы укажете мне на песчаную рябь подводных кос и отмелей. На это я скажу, что текущая вода по отношению к песку (и только песку) не является сферической средой. Песок управляется и движением воды и гравитацией. Т. е. для песка у нас есть две дисимметрии* (*понижение симметрии):

вертикальная гравитационная и горизонтальная

потока воды. Для системы «известняковая скала — река» ни одной из этих дисимметрий нет. Тонуть некому, вода в воде не тонет, а растворение известняка идет идентично, что в движущейся воде, что в неподвижной. Рябь на песке это отражение симметрии стоячей волны в воде на мелководье. При малейшем изменении скорости, или направления, или уровня воды картина ряби сместится или разрушится. Чтобы такие же знаки ряби образовались в подводных условиях на поверхности известняка интерференционная картина воды должна быть неизменной в течение десятилетий — столетий, независимо от паводков и межени. А это абсурд. Симметрия такой среды (песок в среде текущей реки) это симметрия с одной вертикальной продольной плоскостью симметрии (левый берег не отличается от правого), с дисимметрией верх-низ и дисимметрией вдоль потока. Такую же симметрию имеет, допустим, лист папоротника или лист березы. А для скалы та же река будет сферически симметричной средой. Не убедил? Тогда дальше.

Не поленитесь, загляните в интернет. Фотографии из подводных пещер не редкость. Из Ординской, из Мчишты, из других затопленных пещер. Я внимательно посмотрел и фильмы, и фотографии. Фасеточных структур под водой нет. Их там и не может быть. Возможно, они есть в старых фреатических реликтах? Вернитесь к рисунку 38. Там изображен гарантированно фреатический канал. Фасеток нет.

Но может быть они просто не всегда образуются под водой? Есть фреатические каналы с фасеточной рябью, а есть без ряби? Тогда посмотрим фотографии ледниковых пещер. Вы можете просмотреть хоть сотни фотографий подледниковых каналов. Фасеточная рябь есть *всегда*. Более крупная или более мелкая, но она есть всегда (как на рис. 44 снизу). Тогда как объяснить, что в ледниках она есть всегда, а во фреатических каналах лишь иногда? Можете попробовать поискать, но другого ответа вы не найдете, кроме как, что ячейки образуются только из водяных пленок. Когда тает ледник его поверхность *всегда* покрыта пленкой талой воды. Стены пещеры покрыты пленкой лишь *иногда*. И фреатический канал в пещере Кек-Таш покрылся фасеточными формами растворения лишь потом, после ухода большой воды.

Ячейстые (фасеточные) формы имеют ту же природу, что и сфероиды растворения. Но есть и разница. Главное отличие — ячейки приблизительно одинакового, притом небольшого, размера. Похоже, что они не конкурируют или очень слабо конкурируют между собой. Поверхности сфероидов, напротив, съедают друг друга, укрупняясь неограниченно. Второе важное отличие — у ячеек нет приоритета между потолком и боковыми стенками. Среда, создавшая их, судя по этому признаку, не имеет вертикальной дисимметрии. Теперь мы можем сформулировать отличие двух видов поверхностных пленок: пленки, создающие фасеточные формы не подвержены или очень слабо подвержены гравитации. Значит среда такой пленки сферическая. Но - с самоорганизацией (разбиением на отдельные не конкурирующие, но и не объединяющиеся ячейки). Мы получили новый для нас пример того, как в сферической среде возможно проявление принципа антиледенца. Однако же это не затрагивает выше рассмотренные выводы: самоорганизация известна только в пленках, подобных примеров для сферических субаквальных условий не известно.

Ну а когда в леднике вода стекает с ячейки вниз, очевидно, что она стечет в более низкую ячейку, переливаясь через выступающую границу между ячейками. Почему же не образуются каналы протаивания, аналогичные желобковым каррам? Ответ простой. Вода переливается через гребень порциями, очень быстро и стекает быстро. Вода имеет температуру 0 градусов. А нулевая вода не тает

лед. Действие воды, как фактора таяния проявляется только когда она растянута по ячейке в виде пленки. Вода это просто передатчик тепла от воздуха ко льду. Площадная пленка передает тепло, быстро стекающая струя - нет. Лед тает быстрее, если между льдом и воздухом есть прослойка воды.

Рассмотрим пример на рис. 51. Здесь мы видим фасеточную структуру с немного иной геометрией. Ячейки равномерно покрывают всю поверхность полости, включая внутренние поверхности ниш. Это признак сферической среды. Угадывается даже некая направленность ячеек по направлению лево-верх — право-низ. Напрашивается вывод о субаквальном происхождении ячеек в текучей воде. Но не



Рис. 51. Фасеточные структуры, равномерно покрывающие поверхность пещерного хода.

будем доверяться интуиции. Что еще мы можем сказать по фотографии? Поверхность стен сухая, водяных пленок не видно. Значит, рельеф реликтовый в любом случае, примем ли мы гипотезу о субаквальном происхождении или о растворении в пленках. Пол явно со следами потоков, фасеточный рельеф перекрывается слоем аллювия. Значит, аллювий более поздний. Еще мы видим на скале справа длинную вертикальную борозду избирательного растворения по сомкнутой трещине. Такое же углубление по трещине угадывается в верхнем левом углу фотографии. Сие не

противоречит ни той, ни другой теории. Избирательное растворение ни там, ни там не запрещено. Из существенного можно добавить, что такой фасеточный рисунок — типичен для русел подземных рек, например, подобная проработка повсеместно встречается на Снежной реке. Последний остающийся вопрос — способ увлажнения. Должно быть очень равномерное увлажнение, создающее сферическую симметрию среды. Капель сверху исключена, она слишком не равномерна. Остается два мыслимых варианта: конденсация и водяная пыль от реки. Конденсация — явление достаточно редкое, мощно оно проявляется в привходовых частях, где возможно быстрое снижение температуры, сопровождающееся пересыщением. Методом исключения остается водяная пыль от некогда бывшего здесь бурного потока. Водяная пыль мельче обычных брызг и капель. При дневном освещении она никогда не видна, зато в пещерах ее можно увидеть в свете фонаря. Она очень медленно осаждается и может переноситься ветром на сотни метров, увлажняя стены на довольно далеком от порогов и водопадов расстоянии.

Сотовые стенные карры (ячеистые карры, *tafoni*). Я не встречал в литературе объяснения механизма образования сотовых (ячеистых) карров. Возможно, просто плохо искал. Все, что сообщают две найденные мной краткие справки, это то, что они образуются преимущественно в песчаниках или рыхлых известняках. Тем лучше, есть хороший повод подумать самим**. Анализ множества фотографий в сети дает следующее. Образуются они на вертикальных или крутонаклонных поверхностях (рис. 52). На потолках не образуются. На совершенно горизонтальных поверхностях не образуются. В пещерах не образуются. Располагаются преимущественно на освещенных солнцем поверхностях.

Единогласного мнения об образовании сотовых карров нет. Довольно экзотическая гипотеза обсуждалась несколько лет назад на форуме Caves.ru:

<https://caves.ru/threads/Гидродинамический-карст-Статья.53954/>

Согласно данной теории (теории Гидродинамического карста) сотовые карры образовались практически мгновенно в результате кавитационных процессов, вызванных мега-цунами, прокатившимся по планете в результате падения в океан гигантского метеорита. Несмотря на абсурдность вопроса, дискуссия была жаркая, продолжалась более полугода, местами выходя за грани приличий. Здесь мы ее разбирать не будем. Скажу только, что такие дискуссии очень полезны для самопроверки своих знаний, оттачивания аргументации и более четкого оформления своих позиций.

Советую ознакомиться.



Рис.52. Сотовые стенные карры.

Вторая гипотеза отражена в уже упоминавшейся работе А. Климчука о гипогенном карсте. Детального механизма образования ячеистых (сотовых) карров там не приводится. Отмечается, что удовлетворительных гипотез образования tafoni автор не встретил. Из текста понятно, что ячеистые карры — маркеры гипогенного карста. Согласно данной теории, они образуются в стенках гипогенных полостей, в поверхностных слоях стен мощностью 15-25 см., испытавших метасоматоз* (*глубокое химическое преобразование породы, замещение одних минералов другими в процессе обмена с гидротермальными растворами). Как доказательство приводятся данные о том, что изотопный состав по углероду и кислороду сильно различается между слоем tafoni и более глубокими не изменёнными слоями*. Эта разница как раз следствие метасоматоза. Но если tafoni образовались в гипогенных условиях, то как они оказались на дневной поверхности, на вертикальных стенках куэст? Согласно теории гипогенного карста стенки куэст - это гипогенно проработанные стенки каналов, по которым произошла тектоническая отсадка: массив пород откололся по линии пещеры, как по ослабленной зоне. Одна половина упала в долину, вторую половину пещерного хода мы наблюдаем.

**Соотношение стабильных изотопов углерода ^{12}C и ^{13}C и изотопов кислорода ^{16}O и ^{18}O изменяется при самых разных процессах: растворении, конденсации, диффузии из жидкости в атмосферу или обратно и т. п. Сравнивая данные соотношения в разных объектах, можно сделать выводы об их генезисе и вторичных изменениях.*

Согласно данной теории возможна датировка образования ячеистых карров, привязанная к возрасту сталагмитов в гипогенных полостях. Если сталагмиты образовались после окончания гипогенной стадии, то, датируя натёки, мы получим нижнюю границу возраста гипогенных условий. Если возраст самых древних натёков в крымских «гипогенных» пещерах составляет 250 тыс. лет, то возраст ячеистых сталагмитов датируется как более древний.

В принципе, обе вышеупомянутые теории опровергаются одной-единственной фотографией (рис. 49), где карры развиваются практически на наших глазах по рукотворным архитектурным деталям. Но все же этого мало. В природе бывает, что сходные объекты образуются разными путями. Наиболее яркий пример — глаз осьминога и глаз любого из хордовых. Очень похожи. Но они зародились независимо на не связанных эволюционных линиях. Это называется конфлюэнтная аналогия. В неживой природе таких примеров можно привести тоже немало. Например, один и тот же минерал может образоваться в десятке совершенно разных условий.

Я уже упоминал, что ячеистые карры в пещерах не образуются. Странно: если tafoni — реликты, то как получилось, что они сохранились на поверхности, а в пещерах подчистую исчезли? Но будем считать, что и этого аргумента не достаточно. Пока не предложен механизм образования таких

карров, вопрос закрыт не будет.



Рис. 53. Сотовые стенные карры на архитектурных деталях (Инкерманский монастырь, Крым).

Вот как по нашему мнению образуются ячеистые карры. Совершенно правильно замечено, что они образуются в пористых породах — в песчаниках или пористых известняках. Это принципиально важно, поскольку только в пористых породах возможна миграция растворов в самой матрице, а не по трещинам. Второе важное наблюдение — ячейки принципиально никогда не сливаются. Перегородка между соседними углублениями всегда остается. Если мы поймем, почему перегородки не разрушаются, мы поймем всё. Перегородки не ложатся на протяженные прямые линии — значит они не связаны с трещиноватостью. Я даже подозреваю, что для их образования порода как раз должна быть лишена трещин. Ячеистые карры не образуются в пещерах. Что есть на поверхности, чего принципиально нет в пещерах? Солнце и ветер. Значит, что-то из них, или оба сразу принимают участие в их образовании. Солнце умеет быстро высушивать увлажненные участки. Ветер умеет высушивать, а также умеет выдувать материал из ячеек. Ведь ячейки довольно углубленные, мелким дождем из них материал не вымыть. Что такое песчаник? Это нерастворимые в воде зерна (например, кварца), цементированные известковым цементом. Цемент водорастворим, как и любая известь. Это все, что нам нужно знать. Теперь остается только обобщить.

Пористая порода, цементированная карбонатом, пропитывается дождевой водой. Капиллярные силы распределяют воду не пленкой на поверхности, а внутри матрицы. Дождь кончился. Началось высыхание. Солнцем и ветром. Что сохнет быстрее? Хоть немного выступающие части. Углубления остаются влажными. Но капиллярные силы гонят в уже высохшие части воду с соседних микроучастков. А вода уже растворила часть извести. Значит, известь постепенно перераспределяется. На одних участках (на выступах стены) карбонатный цемент накапливается, на других (во впадинах) — убывает. Когда из песчаника удален цемент он рассыпается в песок. Песок выдувается ветром. Образовалось углубление. Дальше дифференциация только усиливается. Внутри каверн тень, да и ветер внутренность каверны высушивает хуже. Значит, преимущественное высыхание перегородок только усиливается, делая процесс необратимым. Чем дальше идет процесс укрупнения каверн, тем больше цемента скапливается в перегородках. Поэтому перегородки увеличивают свою прочность, тогда как участки рядом рассыпаются.

Что еще можно сказать по поводу ячеистых карров? Еще отцами-основателями геоморфологии был сформулирован принцип: ни одна геоморфологическая поверхность не находится в застывшем состоянии. Она либо разрушается, либо развивается. Если ячеистые карры имеют возраст более 250 тыс. лет, то сколько нужно времени, чтобы их уничтожить эрозией? На Кавказе и в Крыму скорость

поверхностной денудации (растворение известняка осадками) приблизительно 0,1 мм/год. За 250 тыс. лет весь карстовый рельеф понизится в среднем на 25 метров. При том, что слой ячеистых каррров, как уже сказано - первые десятки сантиметров. У них не было бы шансов сохраниться.

Правильный вывод будет такой, что ячеистые карры вовсе не реликты, а самоподдерживающиеся устойчивые образования. Они не разрушаются, они образуются в настоящее время.

Что касается изотопного состава, отличного от состава подстилающих *tafoni* пород, то так и должно быть. Растворение и осаждение кальцита, как мы помним, сопровождается дегазацией углекислоты в атмосферу и обратной диффузией. Естественно, что после нескольких циклов увлажнения-высыхания в кальците почти не останется первоначальных кислорода и углерода, унаследованных от коренных известняков или песчаников. Они заменятся на углерод и кислород атмосферы. Т. е. по изотопному составу сотовые карры будут приближаться к составу атмосферы, что как раз совпадает с данными А. Климчука. Так что, все сходится.

**когда глава уже была написана, я нашел аналогичное описание процесса в книге Arthur N. Palmer "Cave Geology" (2007): *Honeycomb weathering ... The holes (also called "tafoni") enlarge by crystallization of minerals carried by seeping water. Poorly soluble minerals such as iron oxides harden the outer rock surfaces, to form lip-like rims around the individual holes.* Еще одна статья нидерландских исследователей: *H. P. Huinink, L. Pel and K. Kopinga «Simulating the Growth of Tafoni», (2004).* Смысл статьи довольно путанный. Вроде авторы поняли, что дело в солях. Но дальше все странно. По их версии выветривание происходит от того, что соли кристаллизационным давлением разрушают породу. На мой взгляд, версия сомнительная: песчаники именно так и образуются — отложением цементирующих солей, и песчаники — отнюдь не рыхлая порода. Авторы не уточняют, о каких солях речь. Возможно, что речь вообще идет о NaCl в связи с близостью моря? Но *tafoni* образуются не только близ морей. Далее: когда период высыхания быстрый, соли выпадают прямо на поверхности породы и осыпаются самые выпирающие ее части. В этом случае тафони не образуются, а образуется сглаженная поверхность. Когда период высыхания, напротив, долгий, соли (почему -? - непонятно) кристаллизуются на глубине. Хотя по логике вещей они должны выпадать и на поверхности и в глубине, до границы с влажным слоем. В этом случае разрушаются днища ямок, которые достигают разрушающегося слоя, а остальное защищено от разрушения выступающей породой. Так ямки все более углубляются. Вроде бы так по их теории. Как-то мне не очень понравилось. Хотя бы тем, что теория не объясняет, и не сможет объяснить, почему толщина перегородок более-менее одинаковая как внутри слоя, так и на глубину. Если бы данная теория была верна, ячейки быстро сливались бы на глубине и вся конструкция распадалась.

В моем варианте разрушение идет как раз из-за вымывания цемента. А выступающие части действуют как насос, выкачивающий соли. Выступающие части сохнут, а капиллярные силы гонят в них новые порции раствора из не высохших частей (днища дырок).

Но если мы отвергли ячеистый рисунок стен как признак фреатических условий, то надо дать в замен хоть что-то. Как отличить фреатический ход от вадозного? Для начала определимся со смыслом вопроса. Почти любой пещерный ход был когда-то фреатическим. Почти любой ход был когда-то трещиной. На этом этапе он был полностью заполнен водой. Исключения лишь трещины бортового отпора, зияющие разломы и т. п. Сузим вопрос: на каком этапе данный ход приобрел существенно нынешние черты: на фреатическом или на вадозном? Пропиленные каньоны, меандры, вертикальные колодцы, залы сразу отпадают. Они, очевидно, субэральные. Для оставшихся ищем следующие признаки.

1. Сечения, характерные для сферической среды образования. Ход округлого сечения с плавными очертаниями, или ход с сечением правильного овала — эти под подозрением на фреатичность. Если фреатический канал закладывался по более крупной тектонической трещине или трещине напластования, то его сечение будет похоже на профиль разрезанного вдоль лимона (рис. 36-3).

2. Более надежный признак это профиль монолитного (не обвального!) пола. Если ход идет то вверх, то вниз, то это важный признак фреатических условий. Но если пол имеет углубления в явном каньоне, то фреатичность исключена, а колебания уровня пола надо объяснять по-другому: водобойными ямами, котлами растворения и т. д.

3. Не все нынешние сифоны сформированы во фреатических условиях. Бывают вполне вадозные ходы, затопленные позднее. Отсюда затопленные каньоны, сталактиты под водой, крупные подводные залы. Но вот подвешенные сифоны это наверняка реликты фреатических каналов, застывших в своем развитии.

Залы-сферы. Сернокислотная коррозия. Я уже упоминал выше, в разделе про потолочные купола, что в плохо проветриваемых пещерах идет особенно активная коррозия при условии, что

внутрипещерная атмосфера богаче по CO_2 атмосферы внешней. Но тогда должны быть внутрипещерные источники углекислоты. В простейшем случае это могут быть смываемые с поверхности почвы, растительные останки. Если эта органика через понор попадет в пещеру и начнет там гнить, то уровень CO_2 повысится. Могут быть и другие источники, вплоть до антропогенных. Например, в подмосковных каменоломнях есть примеры явного поверхностного растворения потолков: «зализанные» очертания некогда острых скальных краев, торчащие из слоя останки раковин, криноидей, иголок морских ежей. Это явные признаки растворения поверхности. Мокрые потолки в каменоломнях не редкость. И одна из версий заключается в том, что от постоянного поступления продуктов горения (костерки, горелки, волокни) вполне мог начаться процесс растворения известняка в мокрых пленках. Есть в каменоломнях и примеры потолочных куполов. Но в то же время есть и явные следы сернокислотной коррозии. Это уже другой вариант активации коррозии.

Что же такое сернокислотная коррозия? Попробую объяснить из самого-самого далека. Все дело в химических особенностях серы. Если рядом с серой есть кислород, то она легко окисляется и существует в виде сульфат-иона SO_4^{2-} . В водах со свободным кислородом — в поверхностных водах суши, в океане, если вода в нем перемешивается, сера существует почти всегда в виде сульфата. Но есть и другие, бескислородные (анаэробные) обстановки. Здесь сера существует в виде сульфид-иона S^{2-} . Где нет кислорода? Там, где нет связи с атмосферой. Например, в болотных или морских илах. Бактерии быстро тратят весь свободный кислород на окисление углерода до CO_2 (окисляя углерод, бактерии получают излишек энергии, этим и живут). На серу кислорода уже не хватает и она существует в виде сульфид-иона. Где еще наблюдается бескислородная обстановка? Например, в Черном море: тяжелые, соленые глубинные воды не перемешиваются с легкими поверхностными и поэтому глубже 200 м. существует сероводородное заражение. Сероводород ядовит (во-первых), а во-вторых, означает отсутствие необходимого для дыхания кислорода. Поэтому Черное море глубже названной отметки почти безжизненно. Кроме серобактерий там никто не живет. Бактерии, использующие серу, бывают двух групп. Одни, сульфат-редуцирующие, отнимают кислород от сульфат-иона и соединяют его с углеродом. Связь кислорода с углеродом более сильная, чем с серой, поэтому на энергетической разнице двух процессов бактерии получают излишек энергии. Общая схема такая:

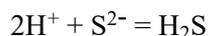


Живут такие бактерии только в анаэробной среде (болота, глубоководные слои Черного моря).

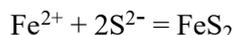
Есть другая группа бактерий: сероокисляющие. Эти живут в кислородной обстановке. Если в их среду попадает сульфид-ион, эти бактерии его окисляют до сульфата, тоже с выделением энергии:



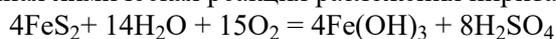
Морские известняки, которые слагают карстовые массивы, образуются на дне морей, в виде карбонатных илов с анаэробной обстановкой. В илах сера сульфидная. Сульфид-ион сам по себе вполне может быть растворим в воде и легко мигрировать. Например, в виде сероводорода:



Сероводород легко переходит из водной среды в воздушную. Но особенность сульфид-иона в том, что почти со всеми ионами металлов он образует нерастворимые соединения и выпадает в осадок. Чаще всего он высаживается ионом железа, по той простой причине, что железо очень распространенный элемент, его очень много в земной коре:



Сульфид железа это минерал золотистого цвета - пирит. В известковых илах он откладывается в виде шарообразных стяжений (конкреций) (рис. 54). В процессе уплотнения донных илов и их обезвоживания они превращаются в монолитную породу (привычный нам известняк). Пиритовые конкреции довольно герметично запечатываются в монолитном известняке и могут сохраняться в породе в неизменном виде миллионы лет. Но как только начинается процесс карстообразования, пиритовые конкреции обнажаются на поверхности карстовых трещин, полостей. И начинают химически разлагаться с образованием серной кислоты. Для реакции нужно всего-то контакт пирита с водой и кислородом. Обобщенная химическая реакция разложения пирита:



Ну а серная кислота мгновенно реагирует с известняком, образуя сульфат кальция. Сульфат кальция (с двумя добавочными молекулами воды в кристаллической решетке) это гипс:

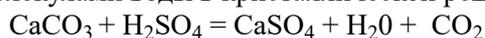




Рис. 54. Расколотая конкреция пирита. Следы сернокислотной коррозии на известняке (каменоломня Сьяны, Подмосковье).

Серная кислота нелетуча, она действует только в растворах. Обычно под гнездом разложившегося пирита мы видим длинный вертикальный канал, прожженный серной кислотой. Нехитрые расчеты показывают, что один объем пирита при разложении в кислоту растворяет три объема известняка. Железо остается тут же в виде гидроксида (охра, ржавчина). Т. е., если вы видите на известняковой стенке изъеденный вертикальный канал с ржавыми пятнами, это сульфидная коррозия (рис. 54). Поищите также гипс. Хотя гипс хорошо растворим в воде и легко выносятся, но где-то он может остаться на испарительном барьере. Гипс — еще один важный признак сернокислотного карста. Особенно, если в геологическом разрезе карстового массива нет явных прослоев гипса, а на стенах пещеры он есть, то это гипс сульфидного происхождения. В качестве примера - фотография из Сахалинской галереи (п. Меженного, верхняя ветвь п. Снежная), рис. 55.

А теперь мы дошли до самого главного. Кислота кислотой, но на этом коррозия не останавливается. Посмотрите на последнее уравнение: в правой части появляется углекислота. А вот



Рис.55. Гипсовый сталактит (слева) и два кальцитовых (справа).

она, в отличие от серной кислоты, летуча и отлично существует не только в растворе, но и в воздухе. И если пещера не продувается, то в присутствии углекислоты начинается интенсивное растворение известняка в водяных пленках. Отличие от рассмотренных выше стеновых сфероидов лишь в повышенной интенсивности процесса. Это позволяет образоваться более крупным поверхностям. При таком механизме могут образовываться раздувающиеся залы шарообразной формы. Эту идею первым придумал В. Мальцев. В письменном виде он ее не зафиксировал, но в его архиве остались схемы для презентации и кое-что я записал по результатам

бесед с ним. Он рассказывал, что где-то в Средней Азии наблюдал такие залы-шары, переходящие один в другой. Причем, что особенно важно, все эти залы располагались в известняке, но под самой дневной поверхностью. Они останавливали свое развитие в метре-полтора от поверхности. Мальцевская идея была очень красива: раздувание полостей контролировалось углекислотой сульфидного происхождения, и было приурочено к крупной сульфидной жиле (которая была неизвестна, но которую он предсказывал)*. Но как только полость приближалась к поверхности, герметичность системы нарушалась, углекислота легко выдувалась из полости и рост полости останавливался прямо рядом с поверхностью.

* Мальцев, кстати, очень боялся за судьбу Кугитанга и п. Кап-Кутан, когда понял, что сернокислотная коррозия играла значительную роль в его формировании: «Не дай бог под Кап-Кутаном сидит крупная сульфидная жила — ради нее разнесут весь массив со всеми пещерами». Так и сказал: «сидит жила».

Теория сернокислотного карстообразования существует в двух модификациях. Первую я уже описал: окисление сульфидов. Второй вариант этой теории в том, что из нижних горизонтов поднимается сероводород (сероводородные воды в природе не редкость). Сероводородные источники есть, кстати, в Абхазии (термальные сероводородные воды в Приморском, рядом с Новым Афоном), есть они в Мацесте. Они как-то связаны с сероводородным заражением Черного моря, и скорее всего имеют источником погребенные морские воды. Сероводород, попадая в кислородную обстановку пещерной полости, окисляется теми же серобактериями до серной кислоты. И далее все, как в варианте сульфидного карста. Разница лишь в том, что сероводород летуч и может окисляться в серную кислоту прямо в водяных пленках на стенах пещеры. Конечный результат тот же — образование гипса и углекислоты. Плюс раздувающиеся залы. Первым, кто предложил сероводородный вариант SAS-теории (Sulfur Acid Speleogenesis) был американский геолог Эгемайер (Egemeier). В 1971 году он предложил этот механизм для Карлсбадской пещеры в США. Примерно в то же время появился и сульфидный вариант теории для той же Карлсбадской пещеры.

В середине 70-х В.Н.Дублянский, работая в Ново-Афонской пещере заметил скопления вторичного гипса на стенах пещеры и сделал совершенно правильный вывод о сернокислотном если не происхождении, то о серьезной проработке пещеры. Он предлагал сероводородный вариант. Хотя в самой Ново-Афонской пещере сероводород не зафиксирован, но вывод был вполне логичный, учитывая многочисленные сероводородные выходы вдоль российского и абхазского побережья Черного моря. Уже в наше время глубокая SAS-проработка Ново-Афонской пещеры подтверждена минералогическими и изотопными исследованиями (О. Червяцова, Ю. Дублянский).

Сейчас SAS-теория активно развивается, в основном в сероводородном варианте. Описаны сотни пещер с подобным механизмом образования.

По этому поводу приведем неоднозначный пример из книги венгерского карстолога и спелеолога Ласло Якуча «В подземном царстве». Он описывает пещеру Шаторкепушта в Венгрии (рис. 56). Залы этой пещеры шарообразные, в виде гроздьев, нанизанных на единый канал. На картинке нет масштаба, но, видимо, размер шаров — первые метры. Якуч пишет, что это гидротермокарстовая пещера, т. е. эти полости — продукт растворения термальными водами. В подтверждение он ссылается на найденный в стенках полости гидротермальный кальцит.

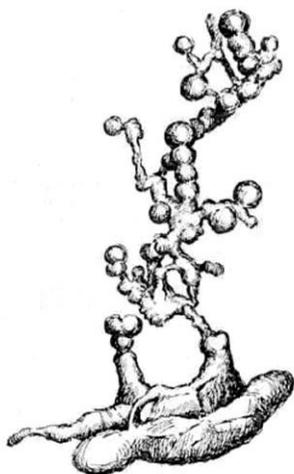


Рис.56. Сфероподобные залы в пещере Шаторкепушта. Из книги Ласло Якуча.

Отдельная глава, посвященная гидротермокарстовым пещерам есть в книге В.Н.Дублянского «Занимательная спелеология». Термокарстовыми там названы такие пещеры как Ход Конем на Чатырдаге и даже Карани на плато Караби. Последние два примера с моей точки зрения совершенно абсурдны. Эти две пещеры ничем не выделяются из сотен других крымских пещер. В них найден гидротермальный кальцит? Но нужно еще доказать, что он сингенетичен пещере. Он мог образоваться гораздо раньше пещеры. Обращу ваше внимание на то, что образование полости это процесс растворения, а заполнение кальцитом жилы это противоположный процесс осаждения. Т. е. уже тут заложено противоречие. Можно, конечно, задекларировать, что это две фазы одного и того же гидротермального цикла. Но чтобы дискутировать на эту тему нужно гораздо больше фактического материала.

Что можно сказать про шарообразные залы Шаторкепушты? Надежно отвергнуть гидротермокарстовую теорию их образования я бы пока поостерегся. Следует тщательно рассмотреть приводимые доказательства. Мы же ориентируемся только на конечные выводы из научно-популярной книги. Но кое-что против этой теории мы можем увидеть даже на приведенном рисунке.

1. Гидротермокарстовые пещеры это с точки зрения геологии всего лишь гидротермальные жилы. А уж эти объекты изучены вдоль и поперек. Это десятки, сотни тысяч объектов по всему миру.

Гидротермальные жилы не бывают шарообразной формы. Это удлиненные, обычно уплощенные объекты, изредка они бывают изометрической формы, но скорее случайно. Никакой тенденции к шарообразности гидротермы не обнаруживают. С чего бы тогда венгерским гидротермам быть шарообразными?

2. Гидротермальные жилы это всегда заполненные кристаллами полости. Источник тепла находится на глубине (магматический очаг, эндогенное тепло). Куда от него мигрирует вода? Вверх, к поверхности, где температура ниже. Значит, раствор течет от зоны насыщения по кальциту к зоне пересыщения. Т. е. гидротермы в основном отлагают материал, а не растворяют окружающую породу. Чтобы было наоборот, должны быть достаточно нестандартные условия.

3. То же самое по давлению. На глубине, откуда поступают термальные воды, гидростатическое давление гораздо выше, чем на поверхности. Значит, и растворимость любых газов в жидкости гораздо выше. А как мы помним, растворимость кальцита зависит от количества углекислоты в растворе. Поднимаясь с глубин, термальная вода стремительно теряет растворенную в ней углекислоту. Значит, при дегазации растворимость кальцита резко снижается, он выпадает в осадок. Что мы и видим на примере отложений травертина вокруг гейзеров и других горячих источников. Тогда с чего бы термальным водам по дороге растворять каналы своего движения?

4. И снова симметрия среды. Ни сферическая, ни цилиндрическая среды сферических форм растворения не дают (несмотря на лингвистическую иронию — оба слова включают слово «сфера»). Можно даже придумать каламбур: *сферическая среда не образует сферы*. Неподвижная водная среда вообще не будет растворять породу, ибо мгновенно достигнет насыщения. Растворять может только сферическая, но подвижная среда, либо цилиндрическая (которая неподвижной и не бывает). Но если у нас есть канал, то растворяться он будет, образуя равномерный вдоль длинной оси цилиндр, обычно уплощенный*. Но никак не раздутые сферы. Так что, скорее всего эти «гроздьи» - продукт сернокислотного растворения в поверхностных водных пленках. (*Изначальные каналы — всегда трещины, то есть плоскости, но никак не изометричные каналы, которым в монолитной породе взяться просто неоткуда. Отсюда уплощенность всех или почти всех гидротермальных жил.)

5. Можно, наконец, сравнить с ныне действующими, достоверно термокарстовыми пещерами. В данном вопросе это никак не «царица доказательств». Но все же. Лично наблюдал только Бахарденскую пещеру недалеко от Ашхабада. По термальному 36-градусному подземному озеру в этой пещере плавал. Сферических форм там нет. Анализ фотографий из интернета по другим пещерам дает тот же результат: сферические залы в термальных пещерах не наблюдаются.

6. Растворимость повышается с температурой? Для сахара - да, для соли - да, для кальцита - да, но только если не учитывать дегазацию углекислоты. Откройте крышку чайника. На стенках — накипь. Это тот же травертин. Ненасыщенная по карбонату холодная вода при кипячении становится пересыщенной из-за дегазации углекислоты. Я полагаю, это чистая психология — считать, что горячие растворы лучше растворяют известняк, чем холодные. Обычный перенос наших наблюдений над сахаром в чашке горячего чая на процесс карстообразования. Еще один пример из бесконечного ряда примеров, что интуиция помогает только в знакомой обстановке. Попытка применить интуицию на незнакомую ситуацию легко даст вам ложный результат.

< конец первой части книги >

Ответ на вопрос-задачу к первой главе. Стенки в пещерном каньоне заваливаются потому, что находятся внутри арки идеального сжатия, на них не действует давление вышележащих пород. Не сдвинутые породы легко осыпаются по трещиноватости. В случае высоких каньонов поверхностных рек никакой арки сжатия просто нет, поскольку две стены каньона не соединены перекрытием. Таким образом, стенки находятся под своим собственным весом - сжимающим вертикальным давлением всей колонны пород. Сжатая конструкция если и заваливается, то только верхними кромками обрывов.