

**В. Андрейчук, Б. Ридуш, Е. Галускин****Пещера Пионерка: условия и специфика криогенного минералообразования**

Андрейчук В., Ридуш Б., Галускин Е. Пещера Пионерка: условия и специфика криогенного минералообразования // Спелеология и карстология, - № 2. – Симферополь. – 2009. – С. 54-69.

Резюме: В статье рассмотрены криоминеральные образования из сезонных натечных льдов гипсовой пещеры Пионерка (Северная Буковина, Украина). Описаны общие особенности и микроклимат пещеры, условия формирования («холодный мешок») и типы ледяных натечных образований, а также – особенности криоминеральных образований (формы и агрегаты, минеральный состав, морфология кристаллов и т.д.). Подчеркивается специфика условий их формирования (наличие холодного и теплого периода, смена кристаллизации таянием), следствием которой является необычайно разнообразный характер агрегатов, а также сложная, порой труднообъяснимая морфология кристаллов, присутствие в криоминеральной массе, кроме гипса, сопутствующих син- и парагенетических минералов (кальцита, целестина, стронциобарита, тридимита). Исследование позволяет сделать вывод о сложно-стадиальном процессе формирования криоминералов, их образовании в неравновесных условиях, присутствии нескольких самостоятельных механизмов и фаз минералообразования (криокристаллизация, испарение пленки и др.). В целом же упомянутые особенности криоминеральных образований могут считаться типичными для гипсовых пещер умеренных широт с сезонным оледенением.

Ключевые слова: гипсовая пещера; пещерный лед, криогенный минералогенез; микроклимат пещер; морфология кристаллов.

Андрейчук В., Ридуш Б., Галускин Е. Пещера Пионерка: умови та специфіка криогенного мінералоутворення // Спелеологія і карстологія, - № 2. – Симферополь. – 2009. – С. 54-69.

Резюме: У статті розглянуті криоминеральні утворення з сезонних напливних льодів гіпсової печери Пионерка (Північна Буковина, Україна). Описані загальні особливості та мікроклімат печери, умови формування («холодний мішок») і типи льодяних напливних утворень, а також – особливості криоминеральних утворень (форми і агрегати, мінеральний склад, морфологія кристалів тощо). Підкреслюється специфіка умов їх формування (наявність холодного і теплого періоду, зміна кристалізації таненням), наслідком якої є незвичайно різноманітний характер агрегатів, а також складна, іноді важко пояснювана морфологія кристалів, присутність у криоминеральній масі, окрім гіпсу, супутніх син- та парагенетичних мінералів (кальциту, целестину, стронціобариту, тридиміту). Дослідження приводить до висновку про складно-стадійний процес формування криоминералів, їх утворення у нерівноважних умовах, присутність декількох самостійних механізмів і фаз мінералоутворення (криокристалізація, випаровування плівки тощо). Загалом же, згадані особливості криоминеральних утворень можуть вважатись типовими для гіпсових печер помірних широт із сезонним зледенінням.

Ключові слова: гіпсова печера; пещерний лід, криогенний мінералогенез; мікроклімат печер; морфологія кристалів.

Andreychouk V., Ridush B., Galuskin E. Pioneerka Cave: conditions and specificity of cryogenic mineral formation // Speleology and Karstology. – N 2. – Simferopol. – 2009. – P. 54-69.

Abstract: Cryomineral aggregations from seasonal drip ice from the Pioneerka Cave (Northern Bukovyna, Ukraine) are considered in the article. General peculiarities and cave microclimate, conditions of formation («cold bag») and types of ice drip aggregations are described, as well as peculiarities of cryomineral formations (forms and aggregates, mineral composition, crystals shape etc). The specificity of conditions of their formation (the presence of cold and warm periods, alternating crystallization and melting), causing quite diverse character of crystals, as well as complicated, sometimes hardly explainable crystal morphology, presence of associated sin- and paragenetic minerals (calcite, celestine, strontium heavy spar, tridymite) in the cryomineral mass are underlined. The investigation allows to conclude about complex-phase process of formation of cryominerals, their development

under nonequilibrium conditions, presence of few independent mechanisms and phases of mineral formation (cryocrystallization, film evaporation etc). As a whole the mentioned peculiarities of cryomineral aggregations can be considered as typical for gypsum caves of temperate climates with seasonal glaciation.

Key words: gypsum caves, cave ice, cryogenic minerogenesis, cave climate; crystals morphology.

ВВЕДЕНИЕ

Пещеры представляют собой специфическую среду минералообразования. Её особенности, применительно к пещерам эпигенного происхождения, заключаются, помимо прочего, в низких (> 25-40°C) температурах воздуха и «минералосодержащих» растворов, сравнительно невысоких концентрациях растворенных веществ в циркулирующих растворах, наличии свободного пространства для роста минеральных агрегатов, резким преобладанием в растворах веществ, связанных с растворением вмещающих пещеры карстующихся пород. Особую разновидность среди обстановок пещерного минерогенеза представляют собой холодные пещеры, в том числе - с формирующимися в них многолетними или сезонными льдами.

С процессами оледенения пещер связано «вымораживание» минерального компонента водных растворов. В северных регионах *криоминерогенетический процесс* отличается простотой и относительным постоянством. В более южных районах рецидивирующий (оттепели) характер таяния-замерзания ледяных образований вносит в него существенные осложнения.

Подземное оледенение пещер – с многолетними наледями – характерно, главным образом, для северных регионов, а также для высокогорных областей. В более южных районах (исключая горы), многолетние подземные наледы в пещерах практически не встречаются. Зато довольно частым явлением в них является сезонное оледенение, связанное с замерзанием просачивающихся в пещеру вод.

Описываемая в статье пещера Пионерка располагается в Украине, на Северной Буковине (47-48° с.ш.), в регионе, где оледенение пещер носит, в связи с климатическими условиями, только сезонный характер.

Статья показывает пещеру как специфический объект (среду) криогенного минералообразования, а также описывает особенности криогенных минералов, формирующихся в условиях нестабильного микроклимата холодной пещеры с сезонным оледенением.

ПЕЩЕРА ПИОНЕРКА – ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Пещера Пионерка располагается на западной окраине с. Погореловка (Заставновский район Черновицкой области), на участке интенсивного закарстования миоценовых гипсов Прикарпатской эвапоритовой формации. Согласно схемам районирования карста региона (например, Дублянский, Ломаев, 1980), участок находится в центральной части Буковинского карстового района. Пещера располагается в концевой части карстового оврага (местное название - Довгий Яр), представляющего собой реликтовый

канал вскрытой пещеры, в настоящее время - каньон с фрагментами сохранившихся сводов в виде арок и мостов (рис. 1, рис. 2-1). Пещера является подземным продолжением карстового оврага.

В настоящее время пещера функционирует как крупный понор, замыкающий на себе поверхностный сток с площади в несколько км², сосредотачивающийся в виде периодически действующего потока в дне оврага-каньона. Временный поток течет по дну каньона, углубляя и расширяя его в месте втекания в пещеру.

Вход в пещеру представляет собой полость (рис. 2-2) в форме угловатой замочной скважины, с расширенной до 4-5 м верхней частью, сужающейся книзу до однометровой щели, заваленной блоками гипса. Общий профиль входа усложняют обрушенные гипсовые блоки.

В морфологическом отношении пещера представляет собой довольно сложное двухуровневое

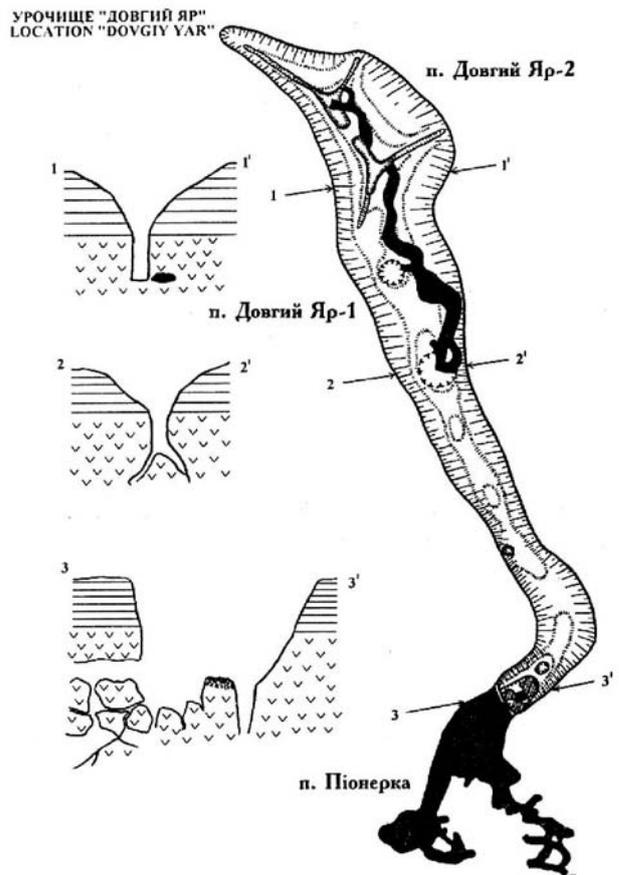


Рис. 1. План карстового урочища Довгий Яр с фрагментами реликтовых пещер (Довгий Яр-1, Довгий Яр-2) и пещерой-понором Пионеркой (по В. Коржику и В. Королюку, 2007).
Fig. 1. Plan of karst valley Dovhyi Yar with fragments of relict caves (Dovhyi Yar – 1, Dovhyi Yar – 2) and ponor-cave Pioneerka (after V. Korzhyk and V. Koroljuk, 2007).



Рис. 2. Реликтовый овраг (1) ведущий к входу (2) в пещеру Пионерка (фото В. Андрейчук, Б.Ридуш).
 Fig. 2. "Unroofed cave" (1) leading to the entrance of the Pioneerka Cave (photo by V.Andreychouk and B. Ridush).

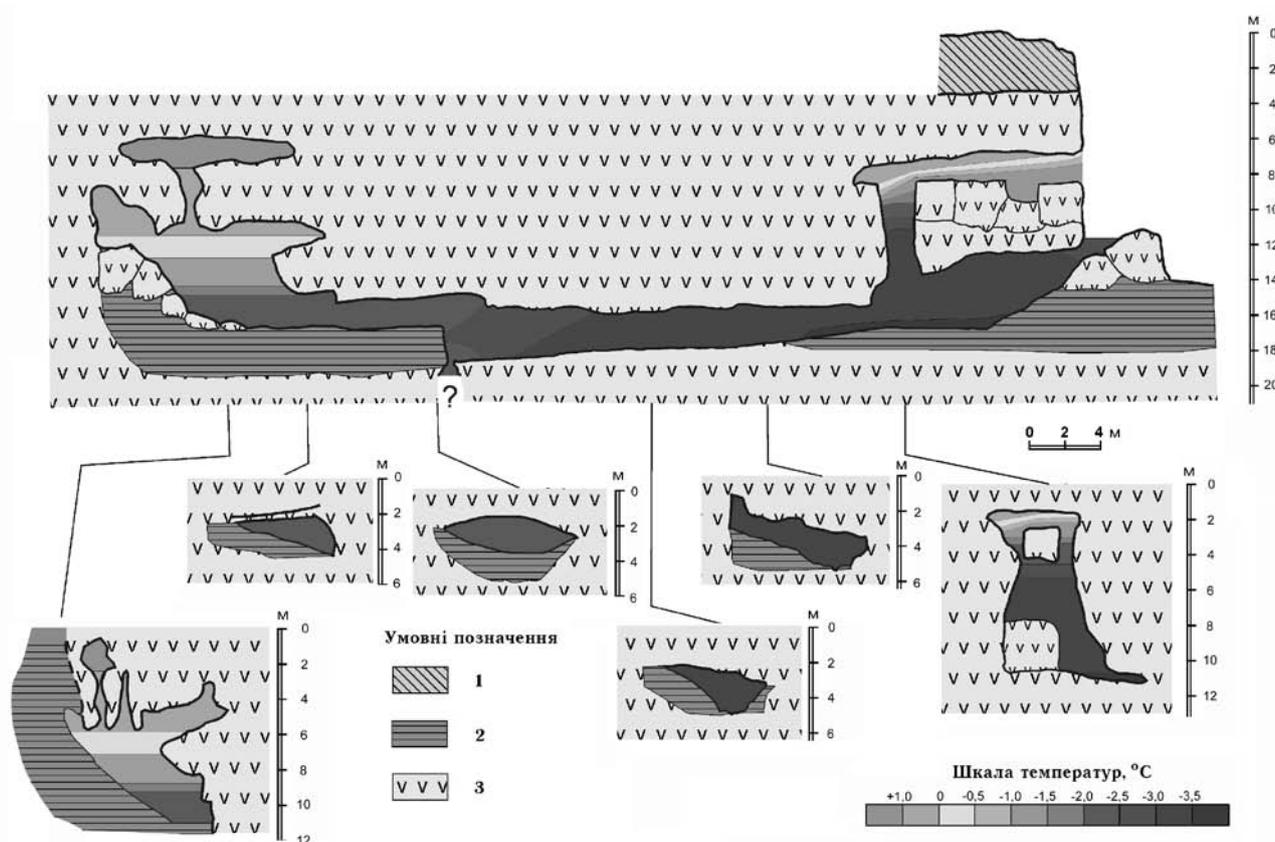


Рис. 3. Микроклиматический разрез через пещеру 5 февраля 2005. 1 - надгипсовый элювий и почва, 2 - пещерные отложения - наносы пещерного ручья, 3 – гипс (по О. Левицька and Б.Ридуш, 2008).
 Fig. 3. Microclimatic section along the Cave (February 5, 2005). 1 – supra-gypsum eluvium and soil; 2 – cave deposits – alluvium of cave stream, 3 – gypsum (after O. Levytska and B. Ridush, 2008).

объемно-ветвистое образование, вытянутое в южном и юго-восточном направлениях. Верхний ярус представлен меандрирующим реликтовым каналом (с небольшими щелевыми ответвлениями), шириной 0.8-2.0м, с уплощенным сводом, овальным расширением в верхней части и отшлифованными водой стенками. В плоском днище канала, развитом по напластованию, в ряде мест зияет коррозионная щель, глубиной 3-6 м, соединяющая канал с нижним ярусом. Нижний

– основной - ярус представляет собой крупную, вытянутую в южном направлении полость, шириной и высотой до 4-7 м, соединяющуюся в целом ряде мест с реликтовыми каналами верхнего яруса. Перепад высот между ярусами составляет 6-8 м, а общая амплитуда полостного пространства -10-12 м. Общая длина ходов пещеры составляет 530 м (Ридуш, Купріч, 2003). Главная часть ее объема (> 80%) приходится на полости нижнего яруса.

Нижний ярус гидродинамически активен: именно в него вливается поток дождевых и талых вод с карстового оврага на поверхности. В продольном профиле днища яруса выделяются три ступени, разделяющие его на разновысотные части: дальнюю – наиболее высокую, среднюю и ближнюю (к входу) – наиболее низкую (рис. 3). Ступенчатость отражает регрессивное отступление подземного понора. Во время дождей водный поток течет до конца нижней ступени, исчезая в глыбовом нагромождении (вглубь), но во время ливневых дождей, когда действующий понор не справляется с большим количеством воды, поток переливается через уступ и вливается на поверхность второй ступени, достигая старшего понора.

МИКРОКЛИМАТ И СНЕЖНО-ЛЕДОВЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ ПЕЩЕРЫ

Важной морфологической особенностью пещеры является расположение основного входного отверстия существенно (4-6 м) выше полостей нижнего яруса – на уровне каналов верхнего яруса. Данное обстоятельство связано с тем, что каньон, по дну которого течет водный поток, заполнен в привходовой части пещеры гипсовыми блоками некогда обрушившегося свода. Такое расположение входа по отношению к полостному пространству предопределяет главную особенность воздухообмена пещеры с поверхностью – сток холодного воздуха сверху вниз, его накопление в пещере и превращение её в так называемый «холодный мешок».

Холодный воздух, накапливающийся за зиму в пещерной «ловушке», в весенне-летнее время нагревается медленно, способствуя формированию и длительному сохранению ледяных образований. Зафиксированы случаи их сохранения на нижнем ярусе пещеры вплоть до июня (Андрейчук, 1988). В зимнее время, в привходовой части пещеры, в месте спуска на нижний ярус, образуются также снежные накопления (ветровой надув), объемом до нескольких кубометров, что также способствует зимнему выхолаживанию полостей. В холодное время года, днище пещеры (нижний ярус) промерзает в её привходовой части до глубины 25 см. Среднегодовая температура воздуха в пещере ниже, чем на поверхности.

Микроклиматические исследования, проведенные в пещере (Андрейчук, 1988, Левицька, Рідуш, 2005; 2008) показали, что в связи со сравнительно небольшими размерами практически вся пещера располагается в пределах поля влияния наземной атмосферы. Тем не менее, морфология (ярусность, прежде всего) предопределяет формирование в пределах пещерного поля двух микроклиматических зон с размытой границей – привходовой, весьма динамичной, и остальной части пещеры – с более выраженными инерционными свойствами (изменения параметров подземной атмосферы). При этом, верхний ярус полостей отличается большей микроклиматической динамичностью, а нижний – большей инерционностью (холодный мешок).

Микроклимат привходовой части пещеры тесно связан с погодными условиями на поверхности и реагирует на их изменения почти синхронно или с

небольшим опозданием. Характерны резкие суточные колебания микроклиматических параметров, прежде всего, температуры. В полости нижнего этажа скапливается холодный воздух, накапливается снег, образуется ледяная корка, покрывающая выступы стен, участки днища и т.д. Инфильтрационные воды, просачивающиеся сверху, замерзают, образуя на верхней площадке входа ледяные сталактиты и сталагмиты, а в галерее нижнего яруса – сталагмиты и ледяные колонны, высотой до 3-5 м (рис. 5, 1-4). На сводах верхнего яруса, вследствие выдавливания снизу (и из глубины пещеры) более теплого и влагонасыщенного воздуха, часто формируются сублимационные образования в виде снежно-ледовых кристаллов «пещерного инея». Замечено, что интенсивность сублимационных процессов возрастает при понижении температуры воздуха на поверхности (Левицька, Рідуш, 2005, 2008). Вследствие замерзания влаги, содержащейся в пещерном воздухе, «выплывающем» из верхнего яруса (при заполнении полостей нижнего яруса холодным воздухом), своды и стены входного отверстия обледеневают. В теплое время года в привходовой части имеют место конденсационные процессы, играющие определенную роль в растворении гипсов и формировании (при испарении влаги) вторичных корок и новообразований.

Инерционная зона пещеры также характеризуется изменениями микроклиматических параметров, однако изменения эти отличаются меньшими амплитудами и отчетливо выраженной инерционностью. Последняя особенно характерна для полостей нижнего яруса. На протяжении всего года здесь наблюдается 100% или близкая к ней относительная влажность воздуха.

Сезонная динамика микроклимата в пещере в целом выглядит следующим образом. С момента первых заморозков, которые случаются в этом регионе уже в октябре, и до «разгара» зимы наблюдается постепенное выхолаживание пещеры, особенно – нижнего яруса, где в морфологической ловушке (ближняя, наиболее низко положенная часть пещеры) накапливается и стагнирует холодный воздух (рис. 3). Процесс выхолаживания сопровождается замерзанием инфильтрационных растворов – вначале на нижнем ярусе (растущие сталагмиты, колонны), а затем и на верхнем. Рост ледяных образований особенно активен во время оттепелей, когда значительное количество талой воды просачивается в холодную пещеру. В это время образуются ледяные сталактиты, драпировки, сталагмиты, сталагматы, колонны-ледопады, покровы и другие формы натечного льда.

Наиболее низкие температуры воздуха в пещере наблюдаются в январе (рис. 4-1). С февраля пещерный воздух обоих ярусов начинает медленно прогреваться (рис. 4-2, 4-3), однако на верхнем ярусе процесс этот идет быстрее, причем асинхронность нагрева ярусов по мере возрастания наружных температур увеличивается. В марте-апреле, после перехода среднесуточной температуры через ноль, на верхнем ярусе устанавливаются устойчиво-положительные температуры, неуклонно возрастающие вслед за весенним прогревом воздуха на поверхности. В нижнем же ярусе продолжают господствовать отрицательные или близкие к нулю температуры, причем в таком

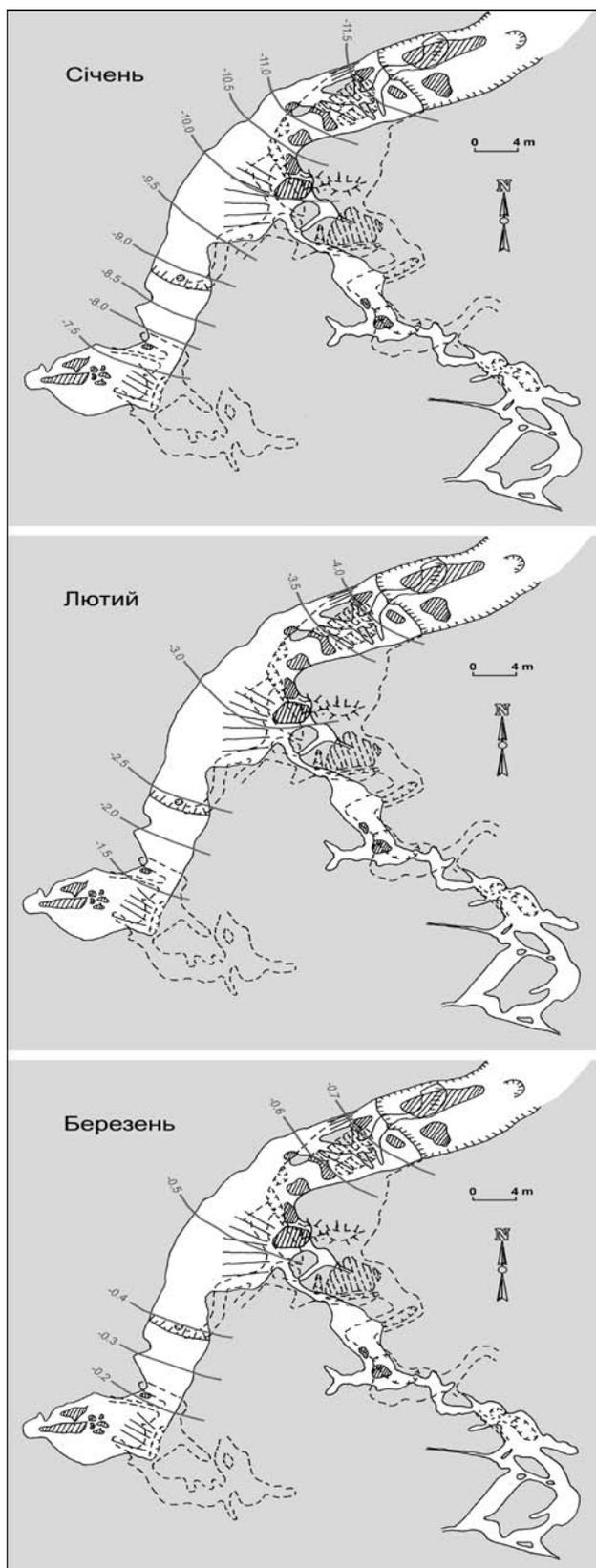


Рис. 4. Распределение температур воздуха на нижнем этаже пещеры: 1 - в январе (26.01.2005); 2 - в феврале (05.02.2005); 3 - в марте (04.03.2005) (по О. Левицька & Б. Ридуш, 2008).

Fig. 4. Distribution of air temperature in the lower storey of the cave: 1 - in January (26.01.2005); 2 - in February (05.02.2005); 3 - in March (04.03.2005) (after O. Levytska and B. Ridush, 2008).

состоянии «озеро» застойного холодного воздуха (рис. 3) может сохраняться до мая. Дополнительное охлаждающее действие оказывают на подземную среду медленно тающие ледяные образования. В среднем, лишь к концу мая - началу июня в полостях нижнего яруса температура воздуха переходит в область стабильных положительных значений, однако прогревается нижний ярус только к июлю-августу. При этом вертикальная стратификация температур воздуха (уменьшение сверху вниз) сохраняется между ярусами пещеры и в летнее время. В весенне-летний период некоторое тепляющее на воздух нижнего яруса воздействие оказывает водный поток, в особенности - во время июньских ливней, но также и во время весеннего снеготаяния.

АГРЕГАТНЫЕ ФОРМЫ КРИОМИНЕРАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Подземное оледенение пещеры, имеет, таким образом, сезонный характер с *растянутым периодом таяния* ледяных образований. Это обстоятельство представляется весьма важным для понимания особенностей процессов криоминарагенеза в пещере. Они состоят в том, что криоминарагенетический процесс (образования минералов во время замерзания водного раствора) носит кратковременный (сезонный) характер, а во время медленного таяния ледяных образований, криокристаллы, содержащиеся во льду, подвергаются фазовым изменениям среды (от водной к аэральной), реагируя на них убылью (растворение) или приростом (испарение) массы, а также переходом в разные агрегатные состояния и кристалломорфическими изменениями.

В начале процесса таяния, криокристаллы, содержащиеся в ледяной массе, оказываются в тонкой пленке талой воды на поверхности ледяного образования. В такой среде может наблюдаться подрастворение или полное растворение (более мелких) кристаллов. Однако, смена режима на испарение пленки или её замерзание (а все три процесса - таяние-формирование пленки, её испарение и замерзание - в период весеннего межсезонья могут иметь место даже в суточном разрезе колебаний температур вокруг нулевой отметки), сильно усложняет процесс криоминарагенеза в фазе деградации ледяных образований. Вслед за прогревом воздуха - вплоть до полного исчезновения ледяных образований - все большее значение приобретают процессы испарения влаги, ведущие за собой повторную кристаллизацию (перекристаллизацию) криоминаральных включений, а в финальной фазе - исчезновения ледяного тела - даже кристаллизацию «наново», с образованием новых (не-криогенных) кристаллических морфотипов.

С фазовыми переходами вещества, сопровождающимися «колебательно-прогрессирующей» процесс таяния ледяных образований, связано агрегатное разнообразие криоминаральных скоплений, наблюдаемых на разных этапах таяния ледяных тел - от образований на их поверхности в начале таяния, до белого вещества, остающегося на их месте после полного стаивания (рис. 6, 1-6). Среди обнаруженных и исследованных под микроскопом криоминаральных агрегатов можно выделить: *гипсовый порошок*,



Рис. 5. Сезонные (эфемерные) натечные ледяные образования верхнего (1) и нижнего (2-4) этажей пещеры Пионерка (фото Б. Ридуш).

Fig. 5. Seasonal (ephemeral) drip-ice formations of the upper (1) and lower (2-4) storeys of the Pionerka Cave (photo by B. Ridush).

гипсовую муку, гипсовую пленку, гипсовое молочко и гипсовое тесто (Андрейчук и др., 2001). Каждый из агрегатов характеризуется своими особенностями не только в аспекте «консистенции», но и по микроморфологическим особенностям слагающих их кристаллов.

Гипсовый порошок – белое вещество, проступающее на поверхности ледяных образований во время испарения и подтаивания льда. Вначале плотность частичек на ледяной поверхности незначительна (еле различима), но по мере таяния-испарения льда их количество непрерывно увеличивается за счет

пополнения из более глубоких слоев, последовательно вовлекающихся в термодеграционный процесс. Для выступлений гипсового порошка характерно сохранение визуальной отдельности частичек на поверхности льда. Последняя выглядит как бы «припудренной».

Гипсовая мука – тот же гипсовый порошок на поверхности льда, однако присутствующий в значительном количестве. Визуальная отдельность частичек при этом не сохраняется, и порошок образует маломощный мучнистый слой. По мере увеличения мощности слоя происходит гравитационное осыпание частичек и их накопление под ледяным образованием.

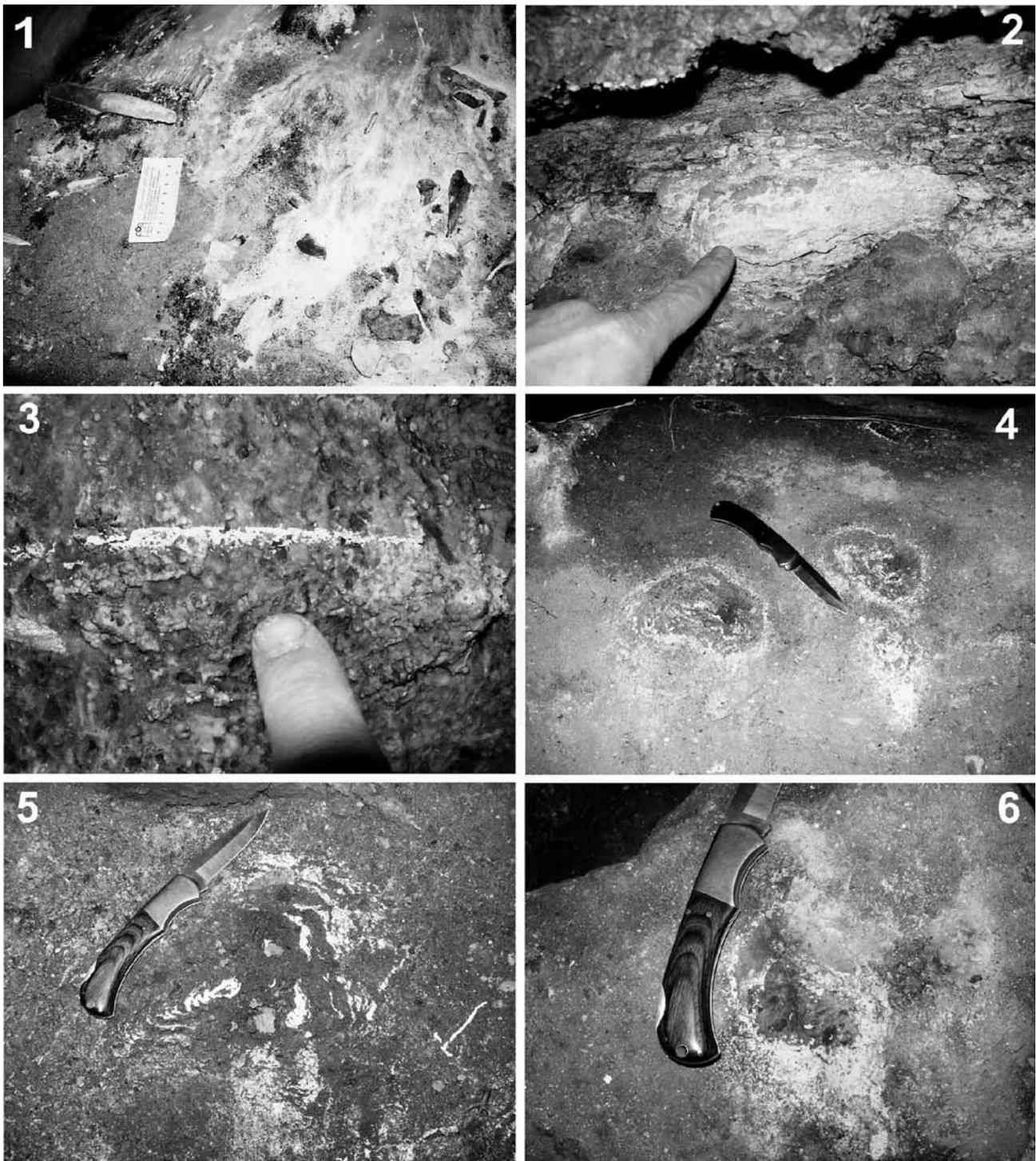


Рис. 6. Остаточные криоминеральные образования на своде (3), стенах (2) и в днище (1, 4, 5, 6) привходовой части пещеры Пионерка: 1 – мучнистый гипсовый порошок на поверхности тающего льда, 2 – гипсовая мука, 3 – гипсовая пленка на месте растаявшей ледяной драпировки, 4-6 – мучнистые образования и фрагменты пленки (5) на месте растаявших сталагмитов (фото В.Андрейчук, Б.Ридуш).

Fig. 6. Residual cryomineral aggregations on the ceiling (3), walls (2) and bottom (1, 4, 5, 6) of the entrance part of the Pionerka Cave: 1 – floury gypsum powder on the surface of melting ice; 2 – gypsum flour; 3 – gypsum film on the place of melted ice drapery; 4-6 – floury aggregations and film fragments (5) on the place of melted stalagmites (photo by V. Andreychouk, B. Ridush).

(Мука – наиболее характерное криоминеральное образование подземных ледников, как например в Кунгурской пещере. Ввиду своего многолетнего характера и непрерывного самовозобновления пещерные леднички действуют как «фабрики» по «производству» гипсовой муки). Образование на

поверхности льда гипсовой муки является следующей, после выступления порошка, стадией формирования криоминеральных агрегатов. Мука возникает при непрерывном пополнении материала за счет испарения льда (как в случае многолетних подземных ледничков) или при начавшейся неотвратимой деградации

ледяного образования (например сталагмита), при которой за счет уменьшения ледяной поверхности происходит накопление гипсового порошка. В силу утраты отдельности и смешивания (слипания) частиц в гипсовой муке возможны, особенно в скоплениях, процессы агрегирования и даже (при наличии влаги) перекристаллизации с увеличением размеров кристаллических агрегатов (сростки кристаллов).

Гипсовая пленка – тончайшая белая пленка (наподобие просвечивающей папиросной бумаги), образованная слипшимися кристаллами гипсовой муки. Встречается на поверхности днищ ходов (не на ледяных образованиях!) в виде удлинённых «бумажных обрывков», длиной от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Агрегаты этого типа обнаружены в Пионерке на верхнем ярусе в привходовой части пещеры. Анализ ситуации показал, что пленочные фрагменты представляют собой криоминеральный остаток, «сползший на конус» (съехавший) с небольших (диаметром до нескольких сантиметров) тающих ледяных сосулек или оставшийся после таяния сосулек, опавших на пол. Морфологическая агрегация частичек в пленочные образования может быть объяснена слипанием частиц вокруг сталактита по мере увеличения их количества при его деградации. Полусферический характер пленочных фрагментов указывает, что первоначально криомучнистые агрегаты, облекавшие сталактит, имели трубчатую форму. Являясь чрезвычайно тонкими и хрупкими они, падая на пол или оставаясь после стаивания упавшего сталактитового наконечника, распадались на характерные фрагменты.

Гипсовое молочко – молокообразная разжиженная криоминеральная масса, представляющая собой размокшую гипсовую муку. Встречается исключительно на поверхности дотаивающих ледяных сталагмитов, на их «головах-бугорках». Образование молочка связано с прогрессирующим (в процессе таяния сталагмита) накоплением на его поверхности гипсовой муки и ее размоканием под влиянием влаги. На заключительных этапах таяния сталагмитов мучнистого порошка становится много, а растущие температуры воздуха обуславливают выделение все большего количества влаги: мучнистый порошок как бы «утопает» в водной пленке, частично растворяется в ней, образуя минеральное молочко.

Гипсовое тесто – белая пастообразная масса на поверхности почти растаявших или растаявших сталагмитов. Является ничем иным, как сгущенным гипсовым молочком. Сгущение молочка начинается в момент прекращения таяния сталагмита (точнее, его исчезновения) и начала усыхания молокообразной массы. Гипсовое тесто – следующая за гипсовым молочком стадия преобразования криоминерального осадка, остающегося после стаивания ледяных сталагмитов. Естественно, что разница между молочком и тестом весьма условна. Тем не менее, стадийным критерием их различения может служить момент прекращения поступления влаги (фактора разжижения) и начала действия процессов испарения влаги (фактора сгущения). Чтобы дополнить картину криоминеральной эволюции сталагмитовых образований отметим, что после стадии гипсового

теста криоминеральная масса высыхает, превращаясь в сухую частично агрегированную массу.

К отдельному типу криоминеральных образований следует отнести *повторно-вмороженные* в лед агрегаты. В зависимости от типа (см. выше) среди них можно различать *ре-криогенные* порошок, муку и т. д. Наиболее частым (в силу особенностей развития метеоявлений) случаем является повторное замораживание под пленкой воды гипсового порошка и гипсовой муки. Явление это имеет место при резкой смене погодных условий (охлаждение после оттепели). Вмороженные агрегаты резко выделяются в прозрачном льду – в виде белых шариков, пятен, полос, цепочек и т.д. Некоторое визуальное отличие вмороженного материала от исходных агрегатов объясняется размоканием материала в пленке талой воды на поверхности льда.

Таким образом, отмеченные выше криоминеральные агрегаты, выявленные в пещере, связаны с различными морфотипами сезонных подземных льдов, а также с особенностями их абляции. Большинство из них укладывается в *термодеградационные ряды*, т.е. представляет собой последовательные стадии агрегирования криогенного материала на фоне таяния ледяного «материнского» субстрата. Примерами таких рядов в случае сталактитов являются: *порошок* → *мука* → *пленка*, в случае сталагмитов *порошок* → *мука* → *молочко* → *тесто*. Естественно, погодные изменения и сезонные климатические циклы нарушают простые схемы вплоть до появления в них временно-возвратных (повторное вмораживание, высыхание) звеньев. Что касается характера и механизмов агрегирования и дезинтеграции криоминеральных масс вопрос этот остается пока невыясненным.

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ И МОРФОЛОГИЯ КРИОМИНЕРАЛЬНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

В мае 2003 года в пещере отобрано 4 пробы криоминерального вещества. Первая и четвертая пробы представляют собой разной степени увлажнения материал, собранный с поверхности ледяных натеков. Первая проба – порошок, соскобленный с влажной тающей поверхности ледяной колонны и сталактита. Четвертая проба – вещество, наиболее близкое к описанному ранее гипсовому молочку – собрано (соскоблено) с подтаявшей поверхности ледяной колонны, в месте выступа. Пробы 2 и 3 – фрагменты пленки - слипшегося порошка, покрывавшего, предположительно, поверхность растаявших ледяных сталактитов.

Весной 2005 года в пещере отобрано еще 5 проб криоминерального материала, оставшегося на месте растаявших ледяных образований (рис. 6). Первая проба представляет собой влажный порошок после растаявшего сталагмита. Вторая и третья пробы отобраны на своде входного грота в месте, где ранее имелись ледяные сталактиты. Пробы представляют собой фрагменты пленок. Четвертая проба представляет собой гипсовое тесто, отобранное в днище верхнего грота на месте растаявшего сталагмита. Последняя проба – высохшая мука, собранная с обвальных глыб в днище верхнего входного зала.

В целом, криоминеральный «спектр» изученных под микроскопом образцов отличается существенным разнообразием (рис. 7). В первой пробе (серия 2003) резко преобладает *гипс*, но довольно много, как для криоминеральных образований гипсовых пещер, *кальцита* (3-10%). Среди кристаллов гипса резко преобладают таблитчатые двойниковые кристаллы. Во многих случаях кристаллы образуют расщепленные формы (рис. 8, 2-6), а также удлинённые сростки (рис. 8, 4-5). Большинство кристаллов гипса имеет на своей поверхности различного рода углубления, предположительно – от растаявших кристаллов льда, в массе которого они находились. Некоторые углубления довольно значительны и напоминают футляры. Во многих случаях грани углублений округлены, что, возможно, указывает на их «подрастворение» во время вытаивания ледяных кристаллов. Некоторые углубления располагаются на гранях кристаллов нерегулярно, образуют своего рода «пористость» и, возможно, связаны с процессами растворения, имевшими место в пленке талой воды на поверхности ледяного натека (рис. 8, 4-5). В массе кристаллов довольно много расщепленных форм, образующих сферолитовые «цветы» (рис. 8, 2-4).

Кальцит «обрастает» кристаллы гипса небольшими ромбоэдрическими кристаллами, довольно однородными по виду и размеру (значительно мельче гипсовых, в целом менее 5 мкм). Кальцитовые зерна-кристаллы как бы «обсыпают» более крупные гипсовые кристаллы (рис. 7, 1-2), но встречаются также внутри гипсокристаллических сростков. Факт преимущественно наружной (на поверхности гипсовых кристаллов) локализации кальцита, возможно, указывает на то, что сначала кристаллизовался гипс, затем кальцит. Кальцитом «обсыпано» большинство таблитчатых кристаллов гипса.

Примесей в пробе мало, представлены они преимущественно, тех же размеров, что и гипсовые кристаллы, глинистыми (гидрослюдистыми, смектитовыми) частицами.

В пробе 4, собранной с выступа на ледяной колонне, в которой, как и в пробе 1, исходным кристаллическим веществом является материал криохимического происхождения, также явно преобладают гипсовые кристаллы и гипсокристаллические агрегаты. Часты сдвоенные кристаллы, в том числе, сложной формы (звездчатые, например). Расщепленных кристаллических форм сравнительно немного. Кроме гипса обнаружены кристаллы целестина, стронциобарита - $\text{SrBa}(\text{SO}_4)_2$, а также в довольно большом количестве – кварца. Обнаружен фрагмент тридимитового сферолита (рис. 7-6). Происхождение кристаллических форм кремнезема в пробе неясно.

Скорее всего, они представляют собой аллохтонную примесь, но вопрос этот требует специального исследования (возможно, что это образования более поздней генерации). Как и в первой пробе, много мелкого кальцита. Кальцитовые кристаллы «поточкованы», природа этого явления неясна.

Большинство гипсокристаллических агрегатов пробы имеет «плоскостное» развитие, указывающее на пленочную среду формирования на поверхности «чего-то» (рис. 8, 7-8). Последнее «что-то» может быть только поверхностью ледяного натека. Неясно, является ли плоскостное развитие кристаллоагрегатов «реликтовым» – от фазы замерзания и кристаллизации веществ из переохлажденного и пересыщенного раствора – или современным, подразумевающим кристаллизацию нового материала из пленочного (таяние) раствора в результате его испарения, сопровождающегося вовлечением в процесс кристаллизации исходного криоминерального материала, его частичной перекристаллизацией, а в целом – срастанием и агрегированием кристаллов разных генераций.

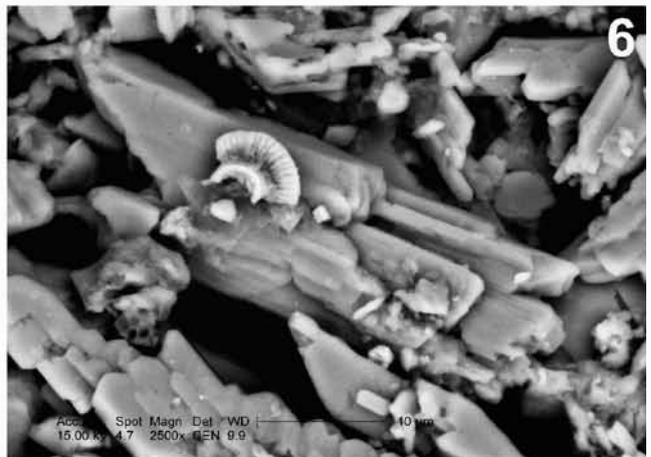
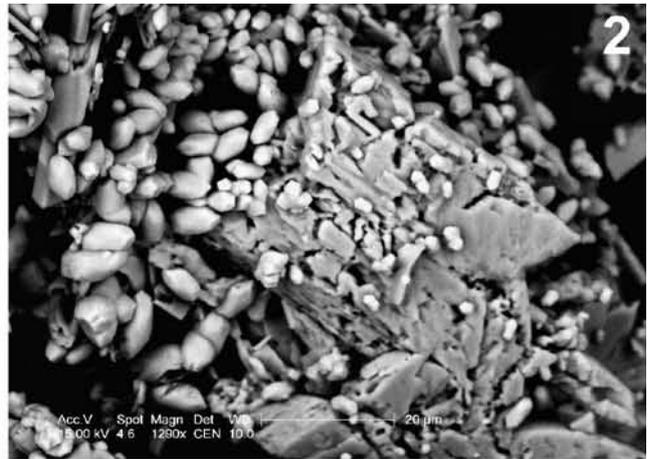
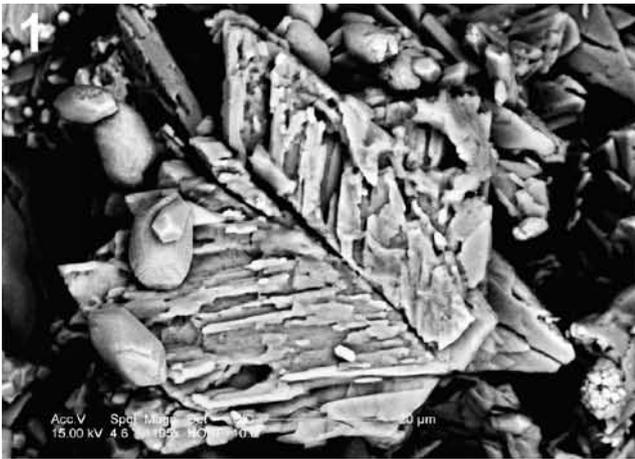
Морфологически (расщепление кристаллов, наличие сростков и т.д.) и минералогически (гипс, кальцит, целестин и др.) неоднородный характер описанных проб может указывать на то, что криоминеральные включения в сезонных льдах при весеннем таянии льдов оказываются снова в пленочных растворах на их поверхности и подвергаются определенным морфологическим преобразованиям. Вопрос этот – о характере преобразований и соотношении в весенних криоминеральных агрегатах «материнского», собственно криогенного (зимнего) и «вторичного» – эвапогенного (весеннего) материала требует тщательного изучения, в том числе, экспериментального.

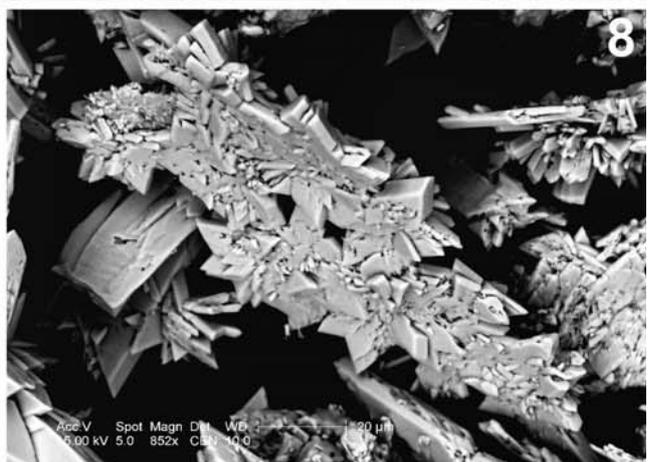
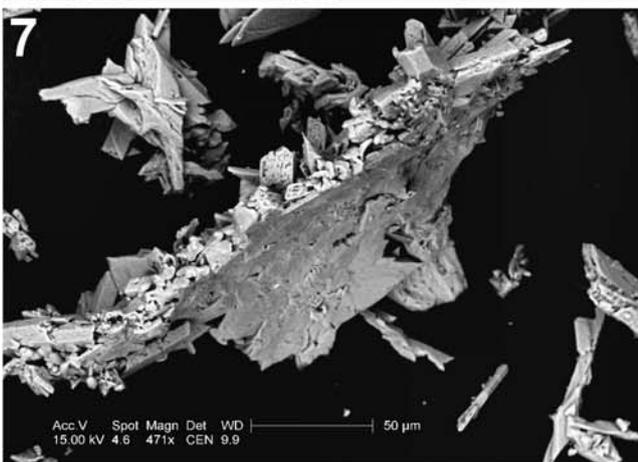
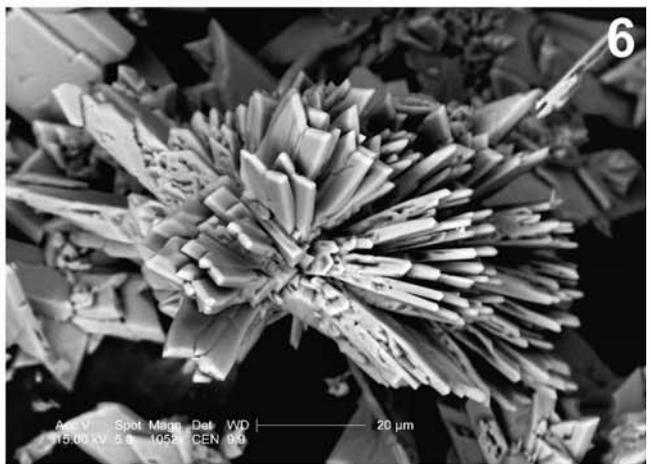
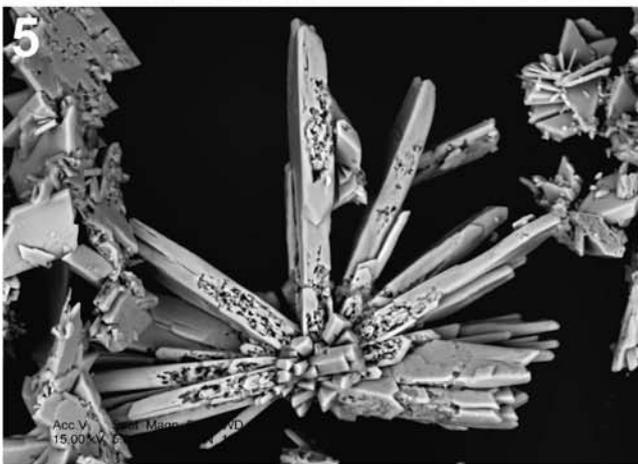
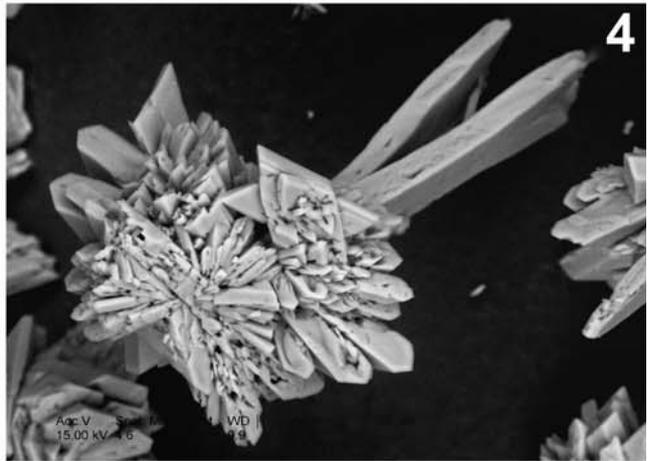
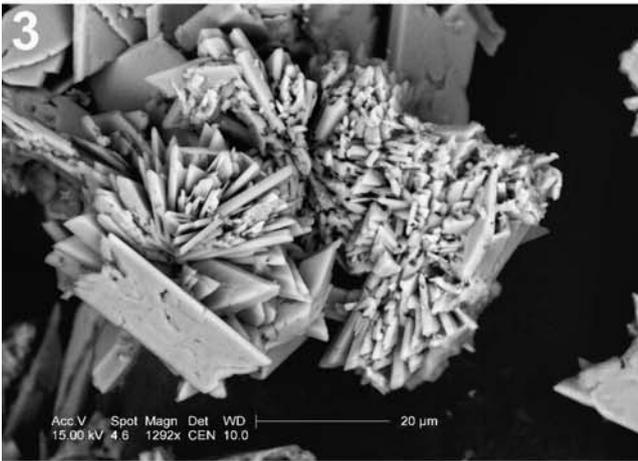
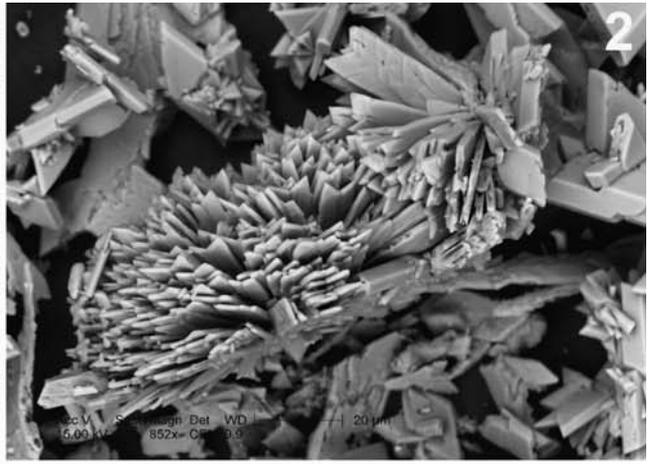
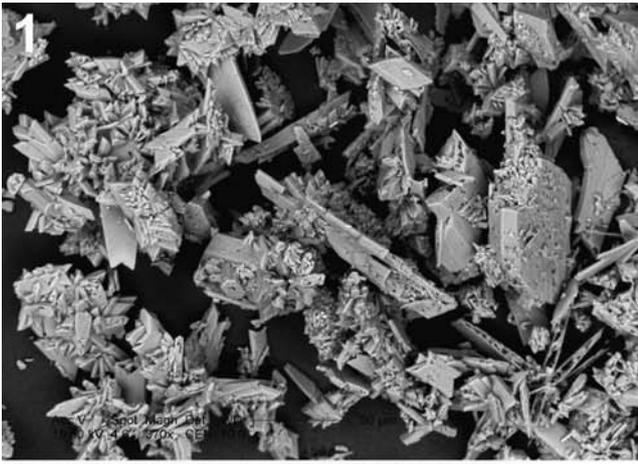
Вторая и третья пробы, представляющие собой миниатюрные (до нескольких мм) фрагменты гипсовой пленки (см. описание агрегатов), собраны на полу верхнего яруса пещеры (рис. 9, фото 1, 3, 7, 8). Предположительно, это агрегированный материал, сползший со сталактитового конуса в своде пещеры.

В основной своей массе пленку образуют удлинённые игольчатые кристаллы гипса, напоминающие высыпанные из коробка спички (рис. 9). Обращает на себя внимание хаотический характер расположения кристаллов по отношению друг к другу и отсутствие видимых структурно-генетических связей между «кристаллами-спичками» - сростков, взаимного прорастания, двойникования, ориентации общекристаллической массы и т.д. При уменьшении масштаба видно, что кристаллическое «сено» образует

Рис. 7 (на след. стр.). Автохтонные (криогенические) и аллохтонные (5, 8) минералы, обнаруженные в составе криоминеральных образований пещеры Пионерка: 1-2 – кристаллы ромбоэдрического кальцита на двойниковом кристалле гипса (1) и на скоплении таблитчатых гипсовых кристаллов (2); 3-4 – игольчатый длиннопризматический (3) и изометричный (4) кристаллы целестина; 5 – обломок (?) кварца; 6 – фрагмент тридимитового сферолита; 7 – моховидные сферолитовые образования из тридимита; 8 – железоникелевый шарик в массе таблитчатых гипсовых кристаллов и глинистых (алюмосиликатных) частиц.

Fig. 7(next page). Autochthonous (cryogenic) and allochthonous (5, 8) minerals detected in the compound of cryomineral aggregations from the Pioneerka Cave: 1-2 – crystals of rhombohedral calcite on the twinning gypsum crystal (1) and on aggregate of tablet gypsum crystals (2), 3-4 - acicular long-prismatic crystal (3) and isometric (4) crystal of celestine; 5 – clast (?) of quartz; 6 – fragment of tridymite spherulite; 7 – mossy spherulite aggregations of tridymite; 8 – iron-nickel globule in the mass of tablet gypsum crystal and clay (silica-aluminum) particles.





тонкую пленку-покров: на это указывают трещинки, по которым они распадаются на отдельные фрагменты.

Происхождение кристаллических образований этого типа авторам неясно. Высокая плотность кристаллов в общей массе, их правильный характер, четко выраженная отдельность, отсутствие на их поверхности каких-либо деформаций или следов (углублений и т.д.), однородный характер кристаллической массы, т.е. явная принадлежность кристалломассы к одной генетической генерации, указывают на быстрое (одноактное) формирование кристаллов в условиях однородной среды (например, испарение водной пленки). Скорее всего, кристаллы этого типа представляют собой эфемерные (весенние) образования, возникающие из тонких пленок минерализованной воды, капающей со свода во время весеннего снеготаяния. Подкрученный характер пленок может быть связан с их формированием в ямках-углублениях в местах капели или с последующим (после образования) иссушением.

Кроме «спичечного» гипса, в материале встречаются «нормальные» таблитчатые гипсовые кристаллы, хотя и в значительно меньшем количестве. Как правило, они намного крупнее кристаллов-спичек и обволакиваются ими. В отличие от предыдущих проб, в пробах 2 и 3 весьма часто встречается целестин (1-2% от общей массы материала). Он, как и гипс, образует длиннопризматические кристаллы (рис. 7, фото 7-3), но чаще – зернистые, изометрические (рис. 7, фото 7-4). В пробах много аллохтонных примесей (собраны с глинистого пола пещеры), преимущественно глинистых и органических частиц. В пробе 3 обнаружен Fe-Ni-вый шарик, предположительно, космического происхождения (рис. 7, фото 7-8).

Пробы серии Б, отобранные в 2005 году, характеризуются следующими особенностями. В первой пробе (материал предположительно на месте растаявшего сталагмита) основная масса вещества сложена длиннопризматическими игольчатыми гипсовыми кристаллами, длиной 5-15 мкм, шириной (толщиной) 1-3 мкм (рис.9, фото 9-4) с утолщениями. Довольно часто среди удлиненных кристаллов встречаются уплощенные варианты, образующие переходные от игольчатых к таблитчатым формам. Редкие крупные кристаллы (более 30-50 мкм) имеют признаки расщепления в головной части.

Как и в пробах 3 и 4 предыдущей серии (А), удлиненные кристаллы образуют хаотические скопления лежащих друг на друге кристаллов. В ряде случаев заметно «слипание» кристаллов, что может быть связано с их подрастворением. В некоторых случаях кристаллы образуют объемно-решетчатые агрегаты, однако неясно, являются ли эти образования «настоящими» (сростки) агрегатами

или это эффект слипания единичных кристаллов и их обломков в процессе подготовки пробы к изучению под микроскопом.

Кристаллическую массу второй пробы (криоминеральный остаток сталактита на своде) образуют смеси довольно крупных (10-40 мкм), иногда «гигантских» (сотни микрон) таблитчатых и сравнительно небольших (длиной 5-20 мкм) игольчатых кристаллов гипса. В одних случаях в смеси преобладают таблитчатые формы, в других – игольчатые, вплоть до полного преобладания одной из разновидностей.

Таблитчатые кристаллы вместе с обломками формируют хаотические скопления. Среди скоплений выделяются два типа: плоских и тонких (1-2 мкм) табличек, с совершенно гладкой поверхностью, и «толстых» (3-7 мкм) табличек – с отчетливо выраженными микроформами растворения на их поверхности (рис. 10, фото 3-4). Грани табличек в обоих случаях выражены отчетливо. В пробе обращает на себя внимание полное отсутствие двойников и расщепленных форм, столь характерных для криоматериала, собранного непосредственно с ледяных образований.

Игольчатые кристаллы, аналогичные «спичечным» кристаллам проб 2 и 3 серии А, образуют массовые скопления единичных кристаллов, иногда ориентированные, напоминающие скошенную траву газона (рис. 9-2). При уменьшении масштаба осмотра видно, что смесь игольчатых кристаллов формирует своеобразный «брикет» как бы спрессованных кристаллов (рис. 9-4). Иногда в игольчатой массе встречаются кусочки кварца, размером 10-15 мкм, проблематического происхождения (рис. 7-6).

Материал третьей пробы отобран с наклонной поверхности обрушившейся глыбы и представляет собой, скорее всего, фрагмент пленки, упавшей со свода (растаявший сталактит). Материал представлен смесью хаотически лежащих игольчатых и удлиненных (вытянутых) таблитчатых кристаллов гипса, длиной 5-30 мкм, иногда более. Подобно предыдущей пробе, кристаллы «упакованы» в «травяной брикет» и образуют пленку, толщиной до 70 мкм. Обращает на себя внимание совершенно плоский характер боковых поверхностей пленки. Причина явления неясна. Одна их плоских поверхностей (внутренняя) может быть связана с поверхностью ледяного образования, на котором она формировалась (испарение раствора), но плоский характер другой поверхности (наружной) остается загадкой.

Четвертая проба представляет собой кусочек гипсового «теста», отобранного с дна верхнего зала. По всей видимости, материал является агрегированным остатком муки на месте растаявшего сталагмита или пленки, упавшей со свода. Тестоподобный характер пробы указывает на то, что материал подвергся

Рис. 8 (на предыдущей стр.). Морфология гипсовых кристаллов криоминеральных образований пещеры Пионерка: 1 – общий вид криоминеральной россыпи, 2-4 – сферолитовые образования в соседстве двойниковых таблитчатых (3) и удлиненных (4) гипсовых кристаллов, 5-6 – сферолитовые (расщепленные) «пористые» образования с внутрикристаллическими «футлярами», 7-8 – агрегаты и сростки таблитчатых (звездчатых) и расщепленных, сложной формы гипсовых кристаллов с плоской нижней поверхностью.

Fig. 8 (prev. page). Gypsum crystals morphology of cryomineral aggregations from the Pioneerka Cave: 1 – general view of cryo-mineral deposit; 2-4 – spherulite aggregations neighboring of twinning tablet (3) and elongated (4) gypsum crystals; 5-6 – spherulite (splintered) “porous” formations with intra-crystal “cases”; 7-8 – aggregates and joints of tablet (star-shaped) and splintered, complex shaped gypsum crystals with flat lower surface.

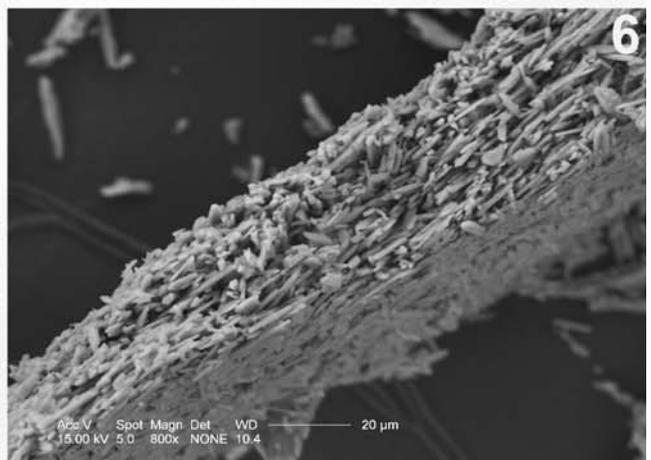
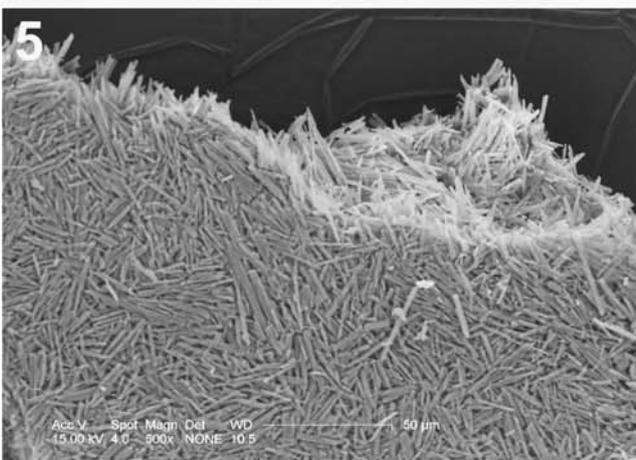
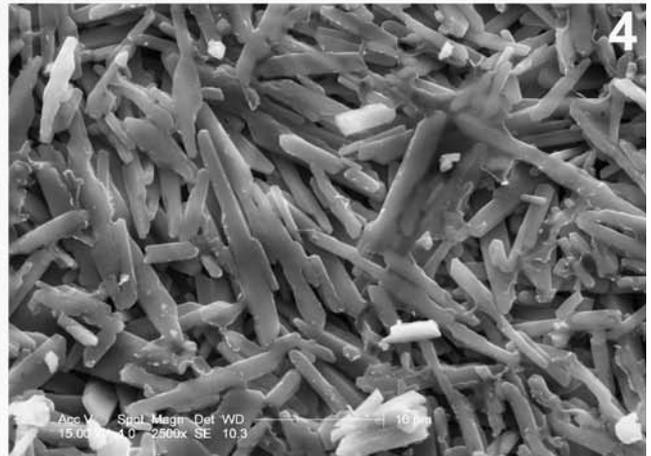
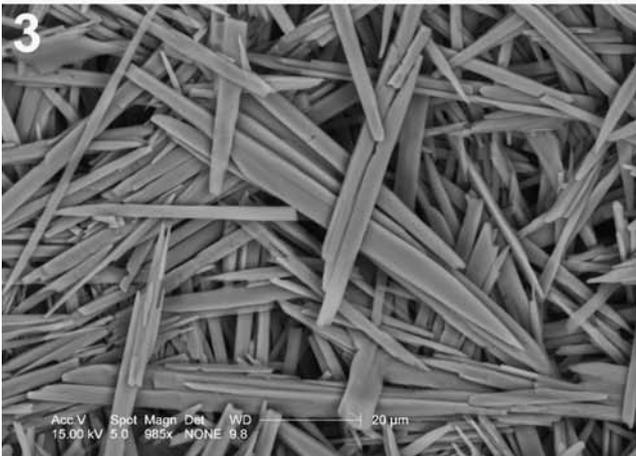
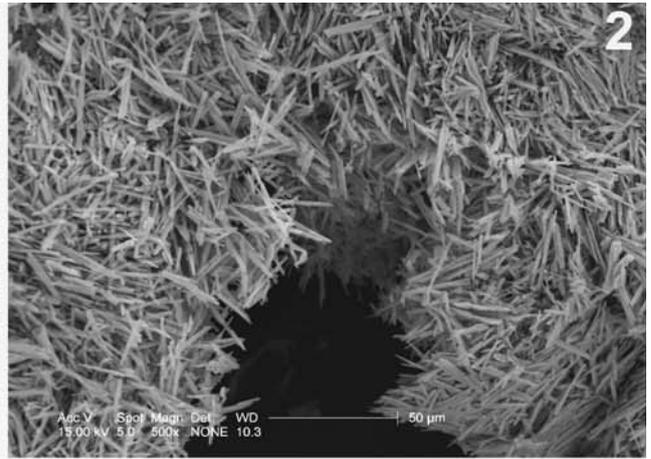
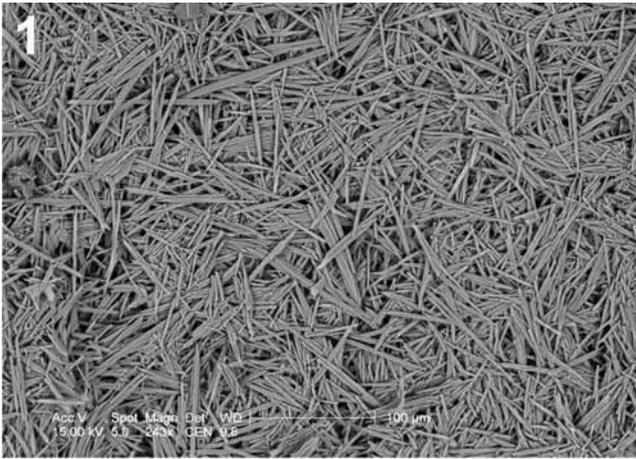


Рис. 9 (на предыдущей стр.). Игольчатые, длиннопризматические гипсовые кристаллы пленочных агрегатов: 1-2 – общие вид агрегатов, 3-4 – игольчатые (3) и длиннопризматические (4) кристаллы крупным планом, 5-6 – «срезы» кристаллических пленок-брикетов игольчатых кристаллов, 7-8 – крупные таблитчатый (7) и длиннопризматический (8) кристаллы гипса в массе более мелких игольчатых гипсовых кристаллов.

Fig. 9 (prev. page). Acicular, long-prismatic gypsum crystals of film aggregates: 1-2 – general view of aggregates; 3-4 – acicular (3) and long-prismatic (4) crystals close-up; 5-6 – “sections” of crystal film- briquettes of acicular crystals; 7-8 – large tablet (7) and long-prismatic (8) gypsum crystals in the mass of small acicular gypsum crystals.

воздействию влаги (капель?). Возможно с этим обстоятельством (перекристаллизация) связано морфологическое разнообразие генераций гипса в пробе. Главные их них следующие:

1. Агрегированные частички-скопления почти изометричных игольчатых кристаллов (5-70 мкм, чаще 20-30 мкм). Кристаллы образуют слепки, двойниковые формы отсутствуют.

2. Игольчатые призматические неправильной формы уплощенные кристаллы разной величины, образующие «пленочные брикеты», толщиной 20-30 мкм (рис. 9-6).

3. Крупные (100-500 мкм) частички гипса правильной (агрегаты) и неправильной (обломки ?) формы. Последние несут на своей поверхности следы растворения (рис. 10, фото 1-2) и имеют, скорее всего, иное, чем криогенное, происхождение.

В пятой пробе (кусочки высохшей муки на поверхности глыб), среди гипсовых кристаллов, подобных первой генерации предыдущей пробы, обращает на себя внимание обилие крупных (сотни микрон) неправильной формы гипсовых кристаллов с различного рода внешними (скручивание, перегибы, закручивание) и внутренними (трещины, сколы, расслоение по плоскостям спайности и т.д.) деформациями (рис. 10, фото 5-8). Природа явления неясна. Крупный размер (100-200 и более микрон), а также неправильная форма указывают на, скорее всего, некриогенный характер частичек. Причиной же деформаций (пластических и разрывных, расслоения) могло быть их временное вмораживание в ледяные тела образующихся эфемерных форм. Непосредственной причиной деформаций являлось боковое давление растущих при замерзании воды ледяных кристаллов.

Выводы

В составе криоминеральных образований пещеры Пионерка обнаружен ряд минеральных видов, имеющих *автохтонное* (криогенное) и *аллохтонное* (прежде всего, аэрозольное) происхождение. К первым относятся гипс, кальцит, целестин, стронциобарит, возможно тридимит, ко вторым – кварц и алюмосиликатные (глинистые) частички, а также металлические шарики антропогенного (металлургия, выбросы в атмосферу) или космического происхождения.

Наибольшим морфологическим и агрегатным разнообразием отличается гипс. Он образует таблитчатые, игольчатые, призматические, двойниковые, расщепленные, сферолитовые и т.д. кристаллы, в ряде случаев – агрегированные или формирующие механические слепки. Кристаллы часто несут на своей поверхности (крупные кристаллы) или внутри (футляры, карманы) следы растворения.

Морфологическое разнообразие кристаллов и агрегатов указывает на сложный и разнообразный, изменяющийся характер условий их образования. На однозначно криогенный (вымерзание-кристаллизация в процессе замерзания водного раствора - при формировании ледяного тела) характер указывают таблитчато-двойниковые, расщепленные и сферолитовые формы кристаллов. Прочие формы – несдвоенные таблички, игольчатые и игольчато-призматические и др. – скорее всего, криогенными не являются, а образуются из водных растворов, в том числе, содержащих растворенный криогипс, в процессе испарения пленок, покрывающих ледяные образования весной. Вопрос этот, однако, требует дальнейшего исследования.

Интересным и невыясненным обстоятельством является также деформированность гипсовых частичек. Если выдвинутые в статье предположения причин формирования игольчатых кристаллов и деформаций гипсовых частиц окажутся правильными, то и в этих случаях ведущая роль в их образовании (и преобразовании) будет принадлежать криогенному фактору.

Проведенные предварительные исследования дают основания предполагать, что для минеральных криогенных образований пещер умеренных широт с сезонным оледенением характерно большее разнообразие минеральных агрегатов, чем для северных пещер или холодных пещер высокогорий - с постоянным (многолетним) оледенением. Завершенный (замерзание-таяние) характер гляциологического цикла в пещерах с сезонным оледенением предполагает наличие важного для процессов криоминерогенеза звена – таяния подземного льда, содержащего криоминеральные включения. В процессе таяния льда имеет место не только механическое освобождение криоминеральных включений, но и их преобразование (частичное или полное растворение кристаллов, их обрастание, возникновение новых агрегатов), а также агрегирование (образование сростков, пленок и т.д.). Фактором, вызывающим процессы кристаллогенеза, является, в противоположность замерзанию, процессы испарения влаги, вызывающие насыщение раствора в пленках талой воды, покрывающей ледяные образования. По этой причине, криоминеральные (возникшие как в фазе замерзания раствора, так и в фазе таяния льда) образования пещер с сезонным оледенением имеют *полигенетический характер* и отличаются более значительным морфологическим разнообразием, чем однофазные криоминеральные включения пещер-ледников.

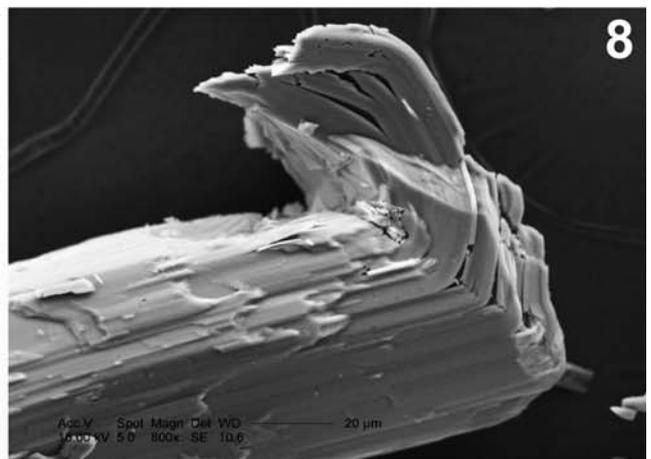
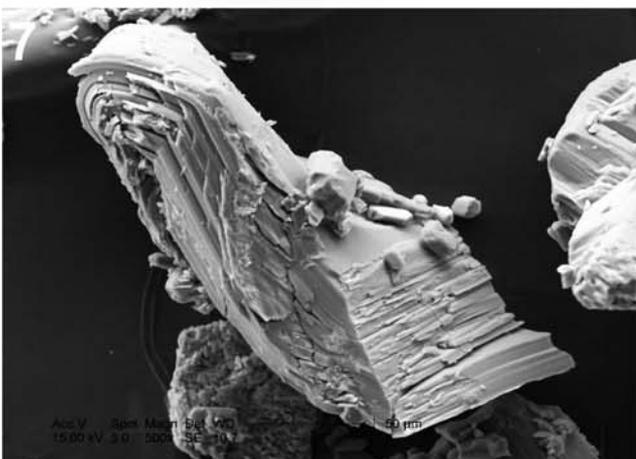
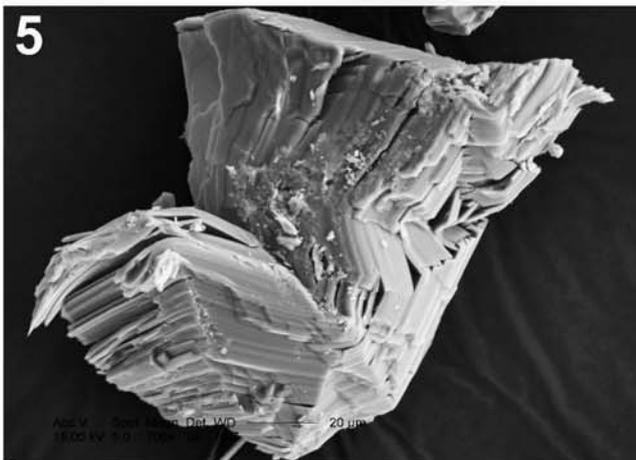
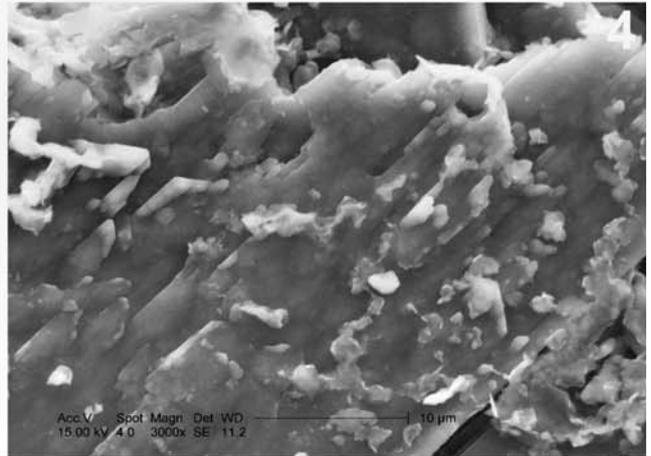
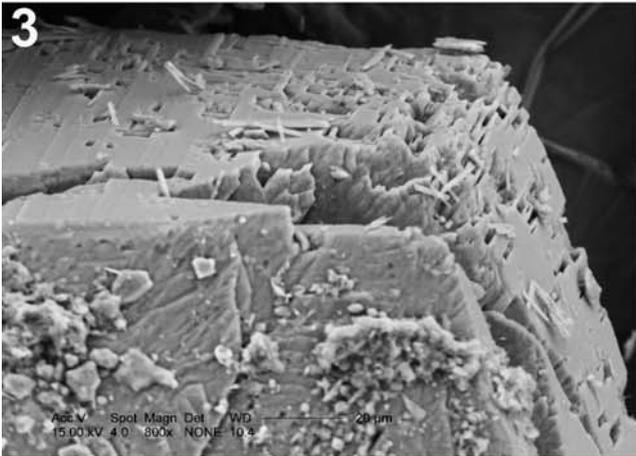
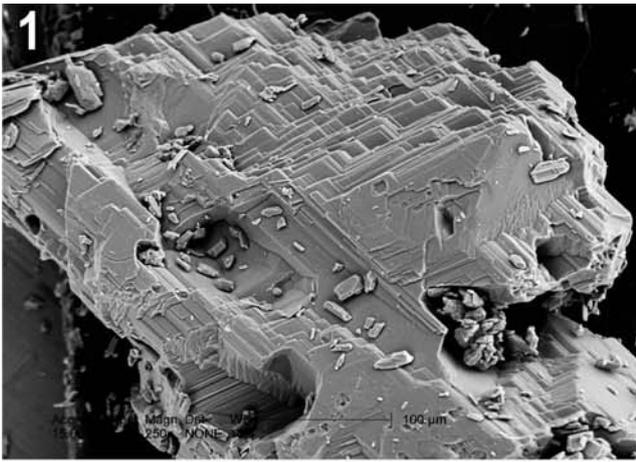


Рис. 10 (на предыдущей стр.). Формы растворения на поверхности гипсовых кристаллов (1-4), а также слоисто-складчатые (криогенические ?) деформации гипсовых частиц (5-8).

Fig. 10 (prev. page). Forms of dissolution on the surface of gypsum crystals (1-4) and laminate-folded (cryogenic ?) deformations of gypsum particles (5-8).

ЛИТЕРАТУРА

- Андрейчук В. Тектонический фактор в развитии сульфатного карста Буковины. – Свердловск: УрО АН СССР, 1988. – 50 с.
- Андрейчук В. Аэрозоли в воздухе пещер: происхождение, распределение, эффекты // Свет. – 1999. – №1 (20). – С. 10-12.
- Андрейчук В., Галускин Е. Криогенные минеральные образования Кунгурской ледяной пещеры // Пещеры. – Пермь, 2001. – Вып. 27-28. – С. 108-116.
- Дублянский В., Ломаев А. Карстовые пещеры Украины. – К.: Наукова думка, 1980. – 180 с.
- Коржик В.П., Королюк В.І. Пещеры Буковины. Атлас-кадастр. – Чернівці: Зелена Буковина, 2007. – 154 с.
- Левицька О., Рідуш Б. Мікрокліматична циркуляція печер гіпсового карсту Буковини // Ландшафти та геоекологічні проблеми Дністровсько-Прутського регіону: Матеріали міжнародної наукової конференції (15-18 грудня 2005). – Чернівці: Рута, 2005. – С. 167-170.
- Левицька О., Рідуш Б. Мікрокліматична циркуляція печери Піонерка (Заставнівський спелеокарстовий район, Північна Буковина) // Науковий вісник Чернівецького університету: Зб. наук. праць. Вип. 391: Географія. – Чернівці: Рута, 2008. – С. 114-122.
- Рідуш Б., Бобылев А., Куприч П. Пещера Буковинка // Свет. – 1998. – №1 (20). – С. 26-29.
- Рідуш Б., Куприч, П. Пещеры Чернівецької області. – Чернівці: Прут, 2003. – 68 с.