



В. Андрейчук, Е. Галускин

Криоминеральные образования пещер: введение в проблематику

Andrejchuk V., Galuskin E. Cryomineral formations of caves: introduction into problem // Speleology and Karstology, - Vol. 1. – Simferopol. – 2008. – P.67-80.

Андрейчук В., Галускін Є. Криомінеральні утворення печер: вступ до проблематики // Спелеогія і карстологія, - № 1. – Сімферополь. – 2008. С. 67-80.

Резюме: Пещеры с подземным оледенением, многолетним или сезонным, являются одной из наиболее интересных и ярких обстановок криоминерогенеза. Главной предпосылкой его широкого проявления в пещерах является повышенная минерализация пещерных вод, особенно, в случае карстовых пещер. Спелеокриоминерогенез заключается в кристаллизации вещества (образовании минералов) в процессе замерзания водных растворов, циркулирующих в пещерах. Количество и характер криоминеральных компонентов пещерного льда зависит от химического состава вод, связанного, прежде всего, с литологией карстующихся пород. В известняковых пещерах доминирует кальцит (разные фазы), в гипсовых – гипс, целестин, кальцит и барит. Примеси представлены как аллохтонными (аэрозоли), так и автохтонными (пещерными) частицами. Криоминеральные образования отличаются своеобразной (характерной) микроморфологией, позволяющей их идентификацию. Криоминеральные исследования представляют большой интерес не только с минералогической точки зрения, но и для различных реконструкций пещерной среды, определения химической денудации и т.д. *Ключевые слова:* криоминералогия; ледяная пещера; подземное оледенение.

Резюме: Печери з підземним зледенінням, багаторічним чи сезонним, являють собою одну з найбільш цікавих та яскравих обстановок криоминерогенезу. Головною передумовою його широкого прояву в печерах є підвищена мінералізація пещерних вод, особливо, що стосується карстових печер. Спелеокриоминерогенез полягає в кристалізації речовини (утворенні мінералів) у процесі замерзання водних розчинів, циркулюючих в печерах. Кількість і характер криоминеральних складників пещерного льоду визначаються хімічним складом вод, обумовленим, перш за все, літологією карстуючих порід. У вапнякових печерах переважає кальцит (у різних фазах), в гіпсових – гіпс, целестин, кальцит і барит. Домішки представлені як аллохтонними (аерозолі), так і автохтонними (пещерними) частинками. Криоминеральні утворення вирізняються своєрідною (характерною) мікроморфологією, що робить можливою їх ідентифікацію. Криоминеральні дослідження представляють великий інтерес не тільки з мінералогічної точки зору, але і для різних реконструкцій пещерного середовища, обчислення хімічної денудації і т.д. *Ключові слова:* криоминералогія, льодяна печера, підземне зледеніння.

Abstract: The caves with underground glaciations (multi-year or seasonal) represent by themselves one of the most interesting and distinct environments of cryominerogenesis. The main prerequisite of its broad occurrence in caves is the elevated content of dissolved solids in cave water especially in the case of karst caves. Speleominerogenesis is a crystallization of the matter (formation of minerals) due to frosting of water solutions circulated in caves. The quantity and character of cryomineral components in cave ice depends first of all on lithological environment. In limestone caves different phases of calcite dominate, while in gypsum caves – gypsum, celestine, calcite and barite are typical. The admixtures are represented by allochthonic (mainly aerosols) and autochthonic particles. Cryomineral formations have a special (typical for them) micro-morphology allowing their identification. Cryomineral investigations are a new and interesting direction of cave mineralogy studies. There are also important for different reconstructions of cave environment, studying of chemical denudation etc. *Key words:* cryomineralogy; ice cave; underground glaciations.

ВВЕДЕНИЕ

Холод, точнее замерзание растворов под влиянием низких температур, также является фактором минералообразования (минерогенеза). Холодное (или криогенное) минералообразование заключается в последовательном выпадении (кристаллизации) из водного раствора растворенных в нем компонентов вследствие повышения их концентрации, неизбежно сопровождающей процесс охлаждения и этапного замерзания раствора.

Соответственно, обстановками криогенного минералообразования с географической точки зрения являются те районы земного шара, где постоянно или периодически наблюдаются отрицательные температуры, прежде всего, полярные регионы, районы с умеренным климатом и холодным (зимним) сезоном, субтропические районы с зимними или ночными спорадическими переходами через 0°C (даже - на широте тропиков, нагорье Тибести в Сахаре, например), а также высокогорья, в т.ч. в экваториальных широтах (массивы Килиманджаро и Кения, горы Новой Гвинеи, Альтиплано – Южная Америка и т.д.).

В аспекте вертикального разреза земной коры, криоминерогенетические процессы проявляются в той его части, где температура пород также близка к 0°C

© В. Андрейчук^{1*}, Е. Галускин¹

¹Силезский университет, Сосновец, Польша

* Кoresпoндyючий автор. E-mail: geo@wnoz.us.edu.pl

или ниже. Такие условия наблюдаются в регионах с многолетней мерзлотой (перигляциальных, горных), мощность которой изменяется в пределах от нескольких до 1000 м, а также в 0.3-2.0 метровом слое сезонно промерзающих пород умеренного пояса. Таким образом, ареной проявления процессов криоминарагенеза является вся *криосфера* Земли.

Одной из частных, но широко распространенных обстановок криоминарагенеза являются подземные пустоты – поры и трещины горных пород, пустоты неправильной формы в выветрелых толщах, осыпях, а также – более крупные полости и пещеры, прежде всего, карстового происхождения (естественно, в границах криосферы). Настоящая - вводная - статья открывает цикл публикаций, посвященных криоминаральным образованиям пещер. В последующих выпусках журнала будут освещены различные вопросы криоминарагенеза в карстовых пещерах с ледяными образованиями (многолетними, сезонными) из разных районов мира (развитых в разной литологической среде).

Криоминарагенезис, терминология

Криоминарагенезические процессы по своей сути близки к процессам *криохимическим* и являются их частным случаем (следствием). Под углом криоминарагенеза криохимический процесс может быть определен шире или уже. При более *широком* толковании, криохимические процессы – это фазовые превращения воды и растворенных в ней веществ, происходящие в отрицательном термическом диапазоне при замерзании водного раствора или таянии льда, сопровождающиеся нарушением химического равновесия в растворе и образованием (кристаллизацией) минеральных фаз (солей). При более узком толковании, под криохимическим процессом понимается изменение химического равновесия компонентов водного раствора вследствие его переохлаждения, влекущего за собой кристаллизацию из раствора минеральных компонентов на разных этапах его замерзания.

Образующиеся при замерзании растворов минеральные соединения можно разделить на *первичные*, возникшие в процессе кристаллизации и *вторичные*, обусловленные преобразованием первичных форм в меняющихся (посткриогенных) условиях (часто более теплых). Криогенные образования пещер условно разделяются нами на:

Криоминаральные включения – кристаллы минералов, содержащиеся в рассеянном виде в ледяной массе пещерных ледяных образований – сталактитов, сталагмитов, колонн и т.д.

Криоминаральные агрегаты – мучнистые криоминаральные образования, представляющие собой сростки (слепки) кристаллов, агрегированных вследствие син- и диагенетических процессов, происходящих в криоминаральной массе.

Криоминаральные отложения – локальные, как правило, не стратифицированные скопления значительных количеств мучнистого (разной степени агрегации) вещества, пространственно тяготеющие к ледяным пещерным телам (их подножию) или участкам их бывшего расположения.

Криоминаральные образования – собирательное название криоминаральных включений, криоминаральных агрегатов и криоминаральных отложений, т.е. вещественных образований, связанных с криохимическими процессами.

ПРОЯВЛЕНИЯ КРИОМИНАРАГЕНЕЗА

Проявления процессов криоминарагенеза весьма многочисленны. К сожалению, до настоящего времени не существует какой-либо обобщающей классификации их обстановок, типов и т.д., упорядочивающих наши представления о криоминарагенезе. Наиболее крупными по масштабу проявления обстановками (помимо *морских* и *континентальных*) являются *районы современного оледенения*, где криохимические процессы связаны с *наземными ледниками*, и районы, в которых криохимические процессы связаны с *подземными льдами*. К последним относятся *районы многолетней мерзлоты*, а также районы, в том числе более южные, где подземный лед накапливается в *подземных пустотах – пещерах*. Отдельную, своеобразную обстановку криоминарагенеза характеризуют *наледы*, образующиеся в холодных районах в зимнее время в местах выхода на поверхность подземных вод. Наледи встречаются как в районах оледенения (на периферии ледников, например на Шпицбергене), так и в районах распространения многолетнемерзлых пород. Зимнее вымораживание *речных и озерных вод* в холодном и умеренном климатических поясах также сопровождается криохимическими процессами. Особую обстановку образуют *высокогорья с нивальным поясом*, где в спектре подчиненных обстановок криоминарагенеза имеются и ледниковые образования, и многолетнемерзлые породы, и наледы, и пещеры т.д., т.е. как и в равнинных регионах. Кроме того, на склонах горных массивов, даже ниже нивального пояса, особенно в более северных регионах, имеет место криоминарагенез в *плеще скальных выветрелых образований (осыпи, курумы, каменные глетчеры и т.д.)*. Среди упомянутых обстановок высших уровней можно выделить множество нижестепенных условий и ситуаций, где проявляются криохимические процессы, сопровождающиеся минералообразованием.

В каждой из отмеченных обстановок наблюдаются определенные сходства и различия механизмов криоминарагенеза. Как правило, криохимический “сброс” растворенных солей является одним из звеньев круговорота этих веществ, например карбоната кальция. На рис. 1, как пример, показана схема такого круговорота в гляциальной и постгляциальной обстановках.

Не имея возможности характеризовать все упомянутые обстановки отметим, что во всех случаях (но в каждом – по своему) происходит образование в значительных количествах криоминарального порошка. Его частицы, как правило, рассеяны в массе вмещающих пород (например, в осыпях), однако после стаивания ледяных тел они могут накапливаться, образуя скопления разной формы и величины (рис. 2-1).

Рассеянные массы криоминаральных образований, чаще всего карбонатные, существенно обогащают отложения на (в) которых они формировались,

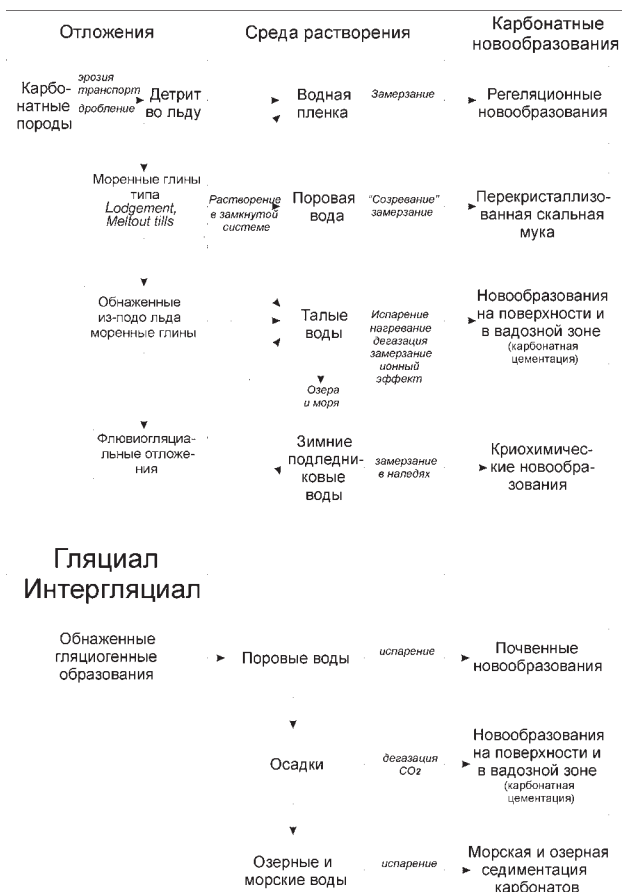


Рис. 1. Схема образования CaCO_3 в геохимическом цикле гляциальной (ледниковой) и межледниковой (постгляциальной) обстановок (по Fairchild и др., 1994, вслед за Bukowska-Jania, 2003 – с изменениями).
Fig. 1. Scheme of CaCO_3 formation in geochemical cycles of glacial and postglacial environments (after Fairchild et al., 1994 and Bukowska-Jania, 2003, with changes).

предопределяя во многом их литологические свойства и эпигенетические превращения. Например, в обломочных скальных массах, покрывающих склоны гор, в результате растворения дисперсных криохимических образований в летнее время (испарение) происходит цементация делювия карбонатным цементом с образованием кор, брекчий и т.д.

Особенно активно “криохимические фабрики” по производству дисперсных карбонатных образований функционировали в плейстоцене. В межледниковья, на смену процессам дисперсионного обогащения приходила цементация, следствием которой явилось формирование различных типов карбонатных образований. Карбонатность плейстоценовых лессов также в значительной мере связана с криохимическими источниками вещества.

Особенно показательным примером криоминерального обогащения отложений являются моренные, зандровые и др. территории, связанные с ледниковым покровом. После его таяния, огромные массы карбонатов были вымыты в рыхлые флювиогляциальные отложения не только обогащая их, но и предопределяя, в ряде случаев, их литологический тип (карбонатные морены, например). По данным Э.

Буковской-Яни (Bukowska-Jania, 2003), содержание криогенного CaCO_3 в ленточных глинистых отложениях северной Польши достигает 15,6%, несколько снижаясь (вследствие выщелачивания) в песчаных зандровых образованиях (8,9%). Столь существенное обогащение флювиогляциальных отложений карбонатами определяет высокие показатели химической денудации на постгляциальных территориях. Так, в модельном бассейне р. Парсенты (Западное Поморье, Польша), а также рек Пилавы и Плитницы, по данным многолетних режимных наблюдений современная химическая денудация составляет 20-32 $\text{м}^3/\text{км}^2$ в год, что сравнимо с таковой в классических районах карбонатного карста Европы (Kostrzewski, Zwoliński, 1992).

СПЕЛЕОКРИОМИНЕРАГЕНЕЗ

Как отмечено выше, подземные полости и пещеры также образуют специфическую среду холодного минералообразования. Процессы криоминерагенеза происходят в них в связи с замерзанием вод (инфильтрационных, инфлюационных, конденсационных и т.д.), поступающих или формирующихся в подземных полостях. Специфика криогенного минералообразования в пещерах заключается, между прочим, в *повышенной* (по сравнению с поверхностными водами, а также водами некарстовых районов) *минерализации замерзающих вод*, особенно в случае гипсового и соляного карста. Это обстоятельство предопределяет *выраженность* процессов криоминерагенеза в пещерах, проявляющуюся в формировании специфического типа пещерных отложений (Андрейчук, 1989). Криоминеральные отложения – это, в основном, мучнистые образования (гипсовая мука, например) на ледяных телах (рис. 2-3), порошкообразные скопления в нишах вытаивания (рис. 2-4) или под ними (рис.2-2), покровы на поверхности ледяных тел (рис. 2-6, 2-7, 2-8), выцветы и остаточные скопления на месте растаявших ледяных образований (рис. 2-5). Образуюсь в диспергированном виде, криокристаллы, осыпаясь, формируют, как правило, небольшие скопления мучнистого вещества, но при благоприятных условиях (морфологические “ловушки-углубления”, циркуляция воздуха) могут накапливаться в значительных количествах, образуя отложения, мощностью до первых метров (например, в пещере Скершоара, в Трансильвании). Естественно, формирование значительных количеств отложений требует значительного времени (тысячи лет) и специфических условий сохранения (при пещерных ледниках, служащих одновременно “производителем” криоматериала и холодильником, исключая его растворение в жидкой фазе). Естественно, помимо факта накопления криоматериала, наблюдается, причем в большей степени, его разнос по пещере (развевание воздушными потоками), растворение и вынос с подземными водами, растворение и повторная кристаллизация в виде “нормальных” (натечных и пр.) отложений, осаждение в рассеянном виде в пещерных отложениях и т.д.

Касаясь различий пещерных обстановок криогенного минералообразования можно отметить следующее. Прежде всего, по условиям минерагенеза отчетливо различаются *пещеры с подземным оледенением*

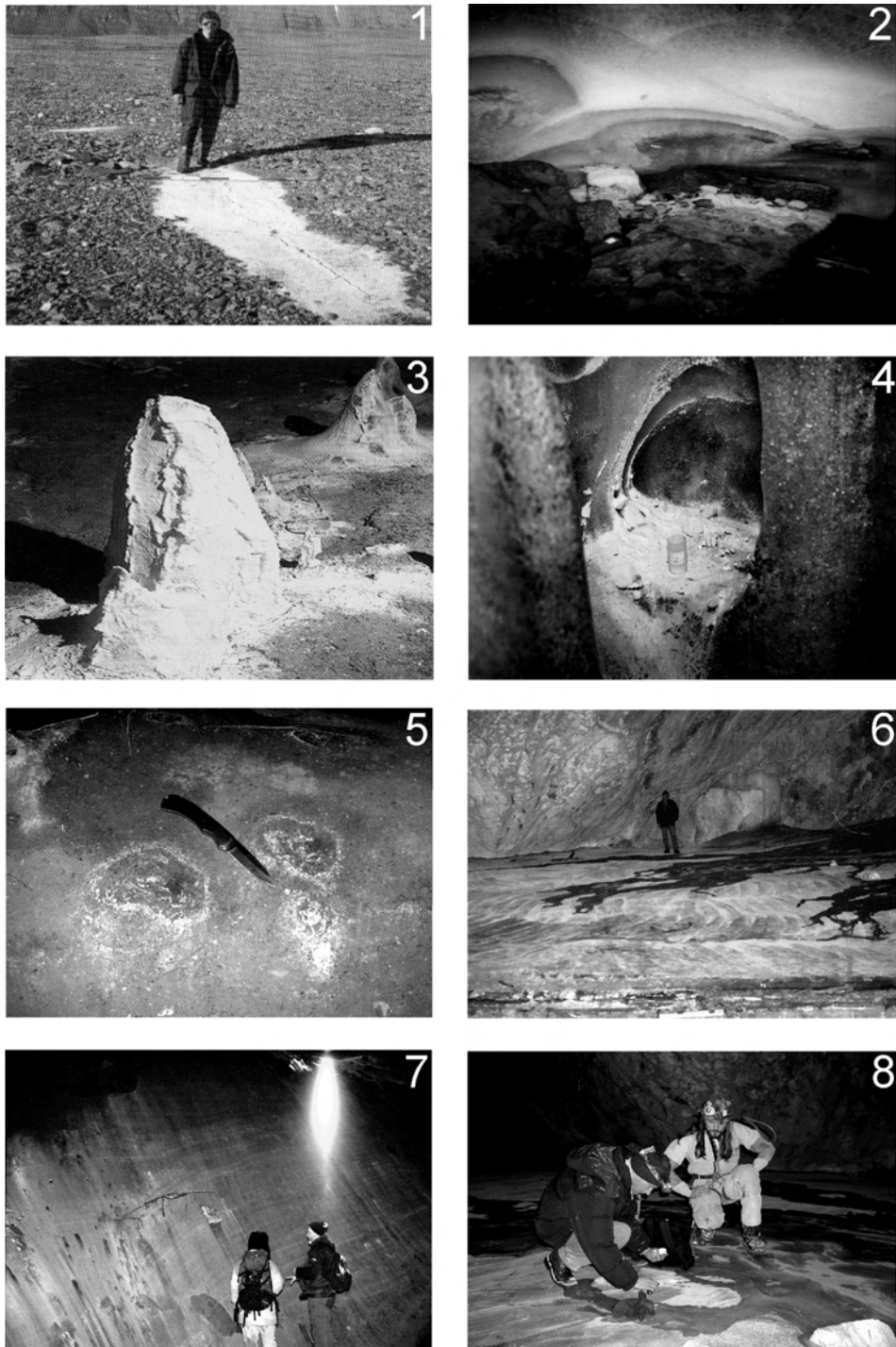


Рис. 2. Формы выступления криоминерального материала: 1 = «выцветы» карбоната кальция на месте растаявшей наледи (Шпицберген, фронтальная часть ледника Веренскелд, фото Э. Буковской-Яни), 2 = осыпание криоминерального порошка под нишей вытаивания (Кунгурская пещера, Россия, фото В. Андрейчука), 3 = тающий ледяной сталагмит, «усыпанный» гипсовой мукой (пещера Пинежская, Архангельская область, Россия, фото В. Николаева), 4 = кальцитовый порошок в нише вытаивания (подземный ледник пещеры Скерিশоара, Румыния, фото А. Помогайленко), 5 = влажный остаточный материал (гипс) на месте растаявших сталагмитов (пещера Пионерка, Буковина, Украина, фото В. Андрейчука), 6 = мучнистый покров криоминерального кальцита на поверхности подземного ледника (пещера Скерিশоара, Румыния, фото А. Помогайленко), 7 = мучнистый покров криоминерального кальцита на склоне подземного ледника (там же, фото А. Помогайленко), 8 = отбор кальцитовой муки с поверхности подземного ледника (там же, фото А. Помогайленко).
 Fig. 2. Different forms of cryomineral formations: 1 = “bloom” of calcium carbonate on the place of melted naledi (Svalbard, frontal part of Verenskiold glacier, photo by Bukowska-Jania), 2 = accumulation of cryomineral powder under ice niche (Kungur Ice Cave, Russia, photo by V. Andrejchuk), 3 = melting ice stalagmite covered by gypsum powder (Pinezskaya Cave, Archangelsk area, Russia, photo by V. Nikolayev), 4 = calcite powder in niche of ice melting (the undrground glacier of Skerishoara Cave, Romania, photo by A. Pomohaylenko), 5 = wet residual material (gypsum) on the place of melted ice stalagmites (Pionerka Cave, Bukovina, Ukraine, photo by V. Andrejchuk), 6 = powder cover of cryomineral calcite on a surface of underground glacier (Skerishoara Cave, Romania, photo by A. Pomohaylenko), 7 = powder cover of cryomineral calcite on a slope of underground glacier (the same place, photo by A. Pomohaylenko), 8 = taking samples of cryomineral calcite from a surface of underground glacier (the same place, photo by A. Pomohaylenko).

(многолетними льдами-наледями) и пещеры с сезонным оледенением (эфемерными ледяными образованиями). “Ледяные” пещеры, как например, Кунгурская (Россия), Добшинская (Словакия), Айсризенвелт (Австрия), Скершоара (Румыния) и др., представляют собой постоянно (в многолетнем разрезе) действующие “фабрики” по вымораживанию из карстовых вод их минерального компонента. Именно в таких условиях имеет место накопление криообразований, в том числе – отложений. Пещеры с сезонными льдами (или переходные зоны холодных пещер) характеризуются меньшим размахом криоаккумуляции и отсутствием видимых крионакоплений. Последнее связано как с небольшим количеством материала, остающегося после таяния ледяного эфемера, так и с последующим растворением криогенного остатка талыми или теплыми инфильтрационными водами, падающими со сводов, например, на место растаявшего сталагмита. В таких пещерах может иметь место лишь дисперсное обогащение пещерной среды карбонатами, сульфатами и т.д. Вследствие сезонной термической нестабильности, пещеры с сезонным оледенением отличаются большим разнообразием и сложностью механизмов криогенеза, а их криоминеральные образования – более сложной эволюцией (циклы растворение-кристаллизация, агрегирование первичного материала и т.д.). Из-за этого, криоминеральные образования сезонно-ледяных пещер морфологически более разнообразны и сложны, а их криогенетическая идентификация временами затруднительна.

Еще одним важным обстоятельством, предопределяющим различия обстановок спелеокриоминерагенеза, является *литологический состав пород*, в которых образовалась пещера (карбонатные, сульфатные, соляные). От состава пород, подверженных растворению, зависит состав проникающих в пещеры и замерзающих там вод, что, в свою очередь, определяет минеральный состав криообразований. В гипсовых пещерах среди криогенных минералов резко преобладает гипс, гораздо реже встречается целестин и кальцит, в пещерах известняковых – почти исключительно доминируют карбонаты кальция (разные фазы, в том числе – метастабильные, например моногидрокальцит, возникающие на ранних стадиях кристаллизации). Гипсовые пещеры более интересны с точки зрения криоминерального разнообразия материала, а известняковые – его фазового состава. Естественно, в составе тех и других в большом количестве встречаются акцессорные минералы, как аллохтонного (принесенные извне), так и автохтонного (внутрипещерного) происхождения. В основном это обломочно-механические частички алюмосиликатов и органика, реже материал космического происхождения. О составе криоминералов соляных пещер данные отсутствуют. Можно предполагать с большой вероятностью, что преобладающими минералами в них будут соответствующие составу литосреды соли.

ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ КРИОМИНЕРАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ПЕЩЕР

Вопросы, касающиеся “ледяной минералогии” пещер, практически неразработаны. Публикации, затрагивающие эту тему, касаются, в основном,

строения и роста ледяных кристаллических агрегатов, в меньшей мере – химического состава растопленных льдов (Максимович, 1947, Максимович, Панарина, 1967, Мавлюдов, 1989, Дублянский и др., 1991, 1992). Вопрос же о минеральных образованиях (примесях, солях) в пещерных льдах, их возникновении и морфологии, практически не выяснен. Определенное, вводное в проблематику значение, имеют публикации авторов с несколькими соавторами (Андрейчук, 1989, Андрейчук, Галускин, 2001, Андрейчук, Галускин, Ридуш, 2004, Andrejchuk., Galuskin, Ridush, 2004, Andrejchuk, Galuskin, Perşoiu, 2005), а также публикации, вспоминающие о криоминеральных образованиях пещер, например публикации пермских авторов: Молоштановой Н. Е., Максимовича Н.Г., Назаровой У.В. (2001), Горбуновой К.И., Молоштановой Н.Е. и Максимовича Н.Г. (2004), в которых в качестве отдельной микрофаши пещерного минералообразования выделены “холодные гроты с ледяными образованиями и россыпями кристаллов гипса, в меньшей степени. кальцита, криогенного происхождения”.

Среди зарубежных работ следует отметить обстоятельную статью коллектива польско-чешских авторов (K. Žák et al., 2004), посвященную криогенному кальциту. Морфология и размеры представленных в статье на фотографиях кристаллов и агрегатов характерны, прежде всего, для его “теплых” форм, хотя, как утверждают авторы статьи, изотопные исследования указывают на криогенную природу описанных образований (кальцитовой “каши”). На 25 спелеологической школе в Сосновце (Польша), в марте 2007 года первым автором упомянутой статьи был сделан доклад о криогенном кальците ледяных пещер.

Следует отметить, что вопросы *криоминерагенеза вообще* разработаны несравненно лучше, чем спелеокриоминерагенеза. Имеются специальные работы, касающиеся, в основном, ледников и наледей, в которых при исследовании их химического состава приводятся важные данные о их минеральном компоненте, а также криохимических процессах, с ними связанных (Алексеев, 1987; Алексеев, Иванов, 1976; Иванов, 1981, 1983; Akerman, 1982; Bukowska- Jania, 1998; Bukowska- Jania, Pulina, 1999; Clark, Lauriol, 1992; Courty et al., 1994; Drozdowski, 1982; Fairchild, Bradby, Spiro, 1993, 1994; Fairchild et al., 1996; 1999; Faure et al., 1988; Ford, Fuller, Drake, 1970; Galuskin, Bukowska- Jania, 1999; Gokhman, 1997; Grasby, 2003; Griselin, Marlin, 1998; Hallet, 1979; Jazuel, Souchez 1982; Killawee et al., 1998 и др.).

Вопросы, связанные с криоминералогией пещер, докладывались авторами на двух совещаниях: на Спелеологической школе в Чешине (Польша, февраль, 2000), и на международном симпозиуме в Румынии (1-st International Workshop on Ice Caves, Câpuş-Cluj, март, 2004). Защищена одна магистерская работа (Катажина Скарвойска – *Криоминеральные образования ледяных пещер*, 2005, Силезский университет, Польша), готовится (под руководством авторов там же) кандидатская работа по данной проблематике.

К настоящему времени, авторами, а также Б.Т.Ридушем (Украина), Я. Зелинкой (Словакия) и О.Кадебской (Россия) отобраны и исследованы пробы криоминеральных образований из пещер Кунгурская,

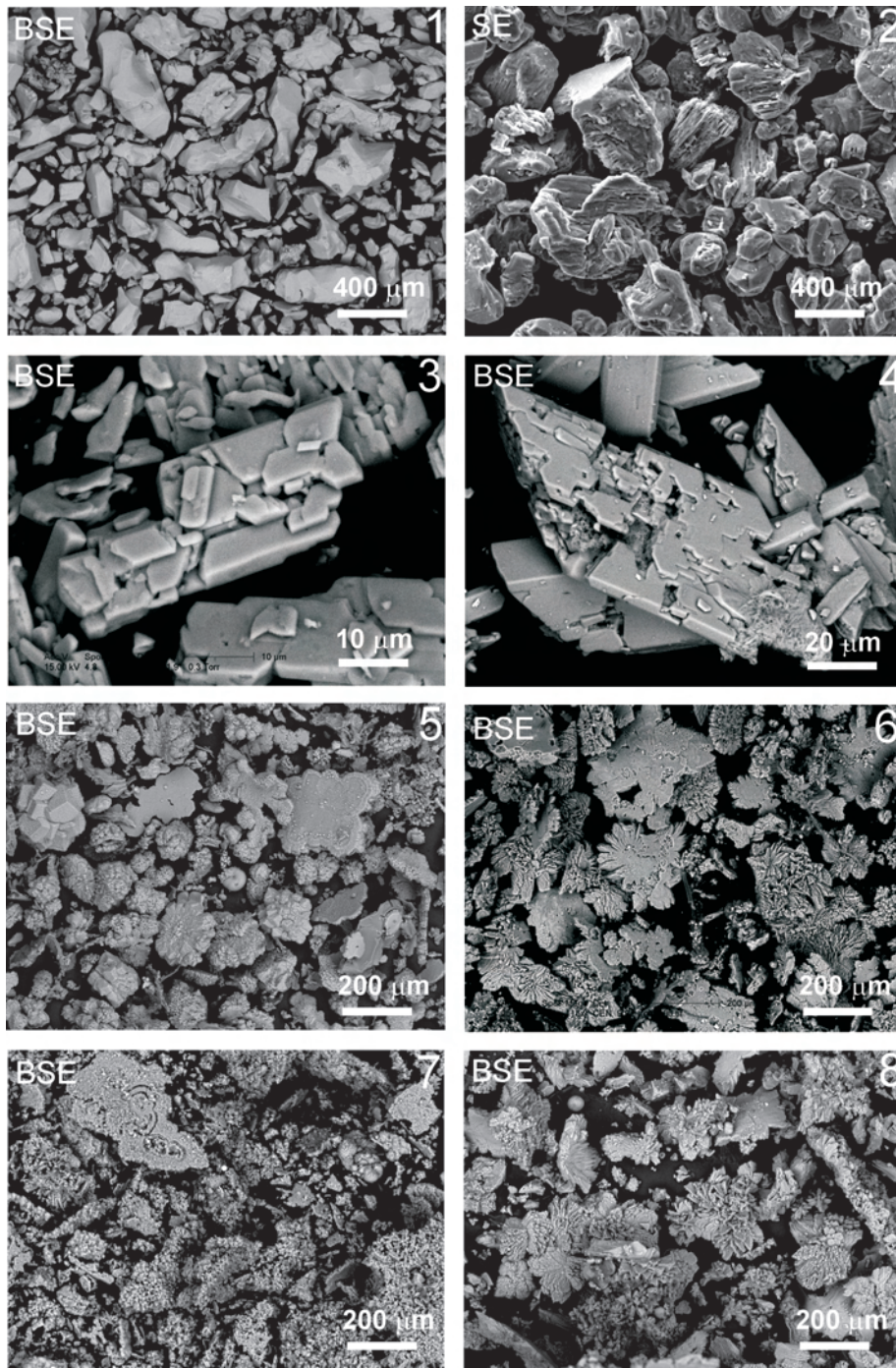


Рис. 3. Гипсовые и кальцитовые дисперсные образования разного генезиса под микроскопом: 1-4 = гипс и ангидрит, 5-8 = кальцит. 1-2 = материал не-криогенного происхождения, 3-8 = криогенный материал. 1 = абразионно раздробленные частички ангидрита (северное побережье Шпицбергена), 2 = гипсовая мука - частички гипса финальной стадии выветривания гипсов (Скитский карьер, Буковина, Украина), 3-4 = плитчатые кристаллы криохимического гипса из пещер Буковинка (3) и Кунгурская (4), 5-8 = общий вид «россыпей» криохимического кальцита: 5 = вымороженный остаток минеральной гидрокарбонатно-кальциевой воды «Наленчовянка», 6 = остаток из растопленного ледяного сталагмита из пещеры Скерিশоара, 7 = материал с поверхности подземного ледника Добшинской ледяной пещеры (Словакия), 8 = то же - пещеры Скерিশоара (Румыния).

Fig. 3. Dispersed gypsum and calcite formations of different genesis under microscope: 1-4 = gypsum and anhydrite, 5-8 = calcite, 1-2 = material of non-cryogenic origin, 3-8 = cryogenic material. 1 = broken (by abrasion) particles of anhydrite (north coast of Svalbard), 2 = gypsum powder – gypsum particles of final stage of gypsum weathering (Skitsky quarry, Bukovina, Ukraine), 3-4 = plated crystals of cryochemic gypsum from Bukovinka Cave (3) and Kungur Ice Cave (4), 5-8 = general view of cryochemic calcite “placers”: 5 = wintered residuum after hydro-carbonate-calcium mineral water “Nalenchowianka”, 6 = residuum after melted ice stalagmite from Skerishoara Cave, 7 = material from the surface of underground glacier of Dobshinska Ice Cave (Slovakia), 8 = the same material from Skerishoara Cave (Romania).

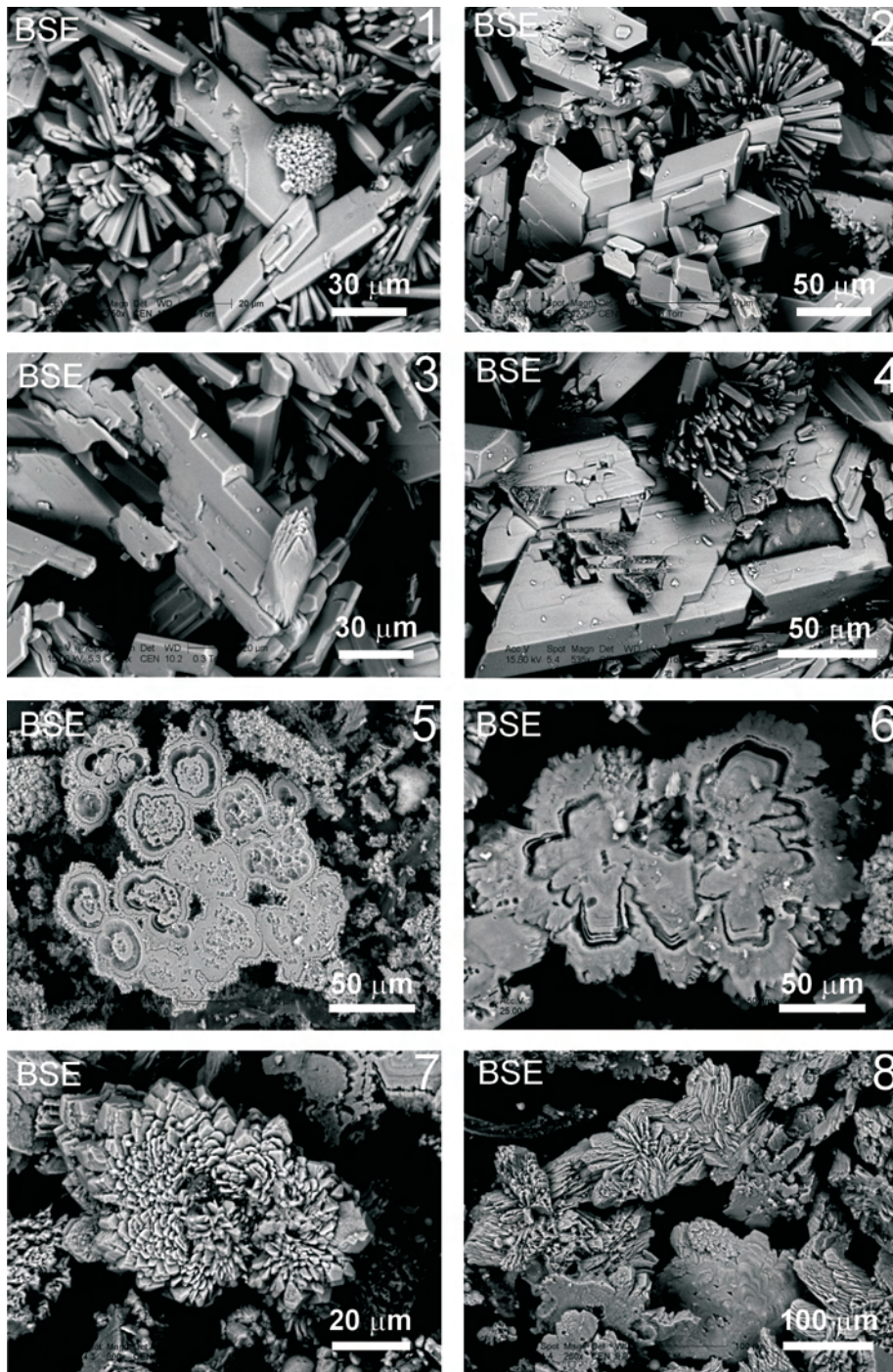


Рис. 4. Главные морфотипы криоминеральных образований из гипсовых пещер (1-4) и пещер в известняках (5-8): 1-2 = характерные сферолитовые агрегаты гипса в массе таблитчатых кристаллов, 3-4 = типичные таблитчатые, в т.ч. двойниковые кристаллы гипса, 5-6 = «подложка» («дно») сферолитовых агрегатов кальцита из пещер Добшинская (Словакия) (5) и Скерिशора (Румыния) (6), 7 = сферолитовый кальцитовый агрегат – вид сверху (пещера Скерिशора), 8 = сферолитовые агрегаты кальцита сверху и снизу (пещера Скерिशора).

Fig. 4. Main morphological types of cryomineral formations from gypsum (1-4) and limestone (5-8) caves: 1-2 = characteristic spherulitic aggregates of gypsum in mass of tabular crystals, 3-4 = typical tabular (twinned also) gypsum crystals, 5-6 = “base” (“bottom”) of spherulitic aggregates of calcite from Dobshinska (Slovakia) (5) and Skerishoara (Romania) (6) Caves, 7 = spherulitic calcite aggregate – top view (Skerishoara Cave), 8 = spherulitic aggregates of calcite – top and bottom view (Skerishoara Cave).

Ординская и Мечкинская (Россия), Пионерка и Буковинка (Украина), Скершоара (Румыния) и Добшинская (Словакия). Криоминеральная проблематика пещер включена отдельным вопросом (впервые) в тематику международной конференции по ледяным пещерам, которая состоялась в мае 2008 года в Кунгуре (Россия).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучение криоминеральных образований пещер в целом характеризуется определенной методической спецификой. Она заключается в необходимости использования аналитической электронной микроскопии и рентгено-структурного анализа, так как криоминеральные кристаллы и агрегаты имеют небольшие размеры (от нескольких – до нескольких десятков, иногда сотен микронов).

Полевые методы (отбор проб) менее специфичны. Следует располагать ножом или металлической пластинкой для сбора порошка с поверхности льда или отложений, небольшой герметической емкостью (бюкс) для его транспортирования, а также большими емкостями - для отбора проб воды или льда (пластиковый термоизолятор). Следует также отбирать породу (на химический состав, микроэлементы и изотопию), что важно для получения достоверных данных о морфогенезе криоминералов. При отборе материала следует следить за чистотой отбираемых проб. Само собой, места отбора следует тщательно документировать (фотосъемка), а также изучать с точки зрения среды минералообразования (микrokлиматические условия, влага и т.д.).

ИДЕНТИФИКАЦИЯ КРИОМИНЕРАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ПЕЩЕР

Изучение проб пещерных отложений или рыхлых поверхностных образований показывает, что такие распространенные минералы как, например, кальцит или гипс могут находиться в них в разном виде. Что касается дисперсных фаз, то и здесь возможны многочисленные морфогенетические варианты микрокристаллов упомянутых минералов. На рис. 3 приведены примеры кальцитовых и гипсовых микрокристаллических образований разного генезиса, некриогенные и – для сравнения – криогенные. Данное обстоятельство делает актуальным вопрос о *криоминеральных признаках* криогенных кристаллов, которые бы однозначно указывали на их криохимическую природу и, тем самым, могли иметь диагностическое значение.

К сожалению, на данном этапе исследований однозначная диагностика криогенетического происхождения материала еще не представляется возможной. Следует изучить большее количество проб, возможно со статистической обработкой, их морфологию, попробовать найти “изотопную поддержку” для морфологических признаков и т.д. В настоящее время, можно полагаться лишь на данные подземных наблюдений, на немногочисленные экспериментальные данные, а также - на ряд морфологических признаков, неизменно сопутствующих криокристаллам.

Что касается подземных наблюдений, то критерием криогенности материала может быть его

нахождение на поверхности ледяных образований – в нишах вытаивания, углублениях, а также во льду, на что указывает иногда его цвет, наличие замороженных скоплений и т.д. На несомненную связь с ледяными образованиями и холодом в определенной мере указывает локализация материала на месте исчезнувших ледяных образований (рис. 2-5).

По части экспериментальных доказательств, к настоящему времени осуществлен (одним из авторов) эксперимент по замораживанию известной в Польше минеральной воды гидрокарбонатно-кальциевого состава (Наленчовянка) с получением криоминерального остатка (рис. 3-5). Исследование кристаллов под микроскопом показало в целом его идентичность криоминеральному порошку, собранному в нишах подземных ледников (рис. 3, 6-8).

По части морфологических критериев криоминерогенеза можно отметить следующее. Как в случае известняковых, так и гипсовых пещер наблюдается схожесть общего характера видимых под микроскопом “кристаллических россыпей” материала, отобранного из разных, но литологически подобных пещер (рис. 3, 6-8). В случае гипсовых кристаллов, при всем их морфологическом разнообразии обращает на себя внимание преобладание таблитчатых кристаллов гипса (рис. 3-3, 3-4,) а также большое количество сферолитовых образований (рис. 4-1, 4-2), сростков с “карманами” и углублениями, часто геометрически правильной формы (отрицательные кристаллы - рис. 3-3, 3-4, 4-3, 4-4). “Дыры” в кристаллах могут иметь разное происхождение (сингенетическое, от растворения, склеивания обломков кристаллов), но в случае криохимического генезиса – с учетом модели кристаллизации (см. ниже) - наиболее правдоподобным представляется их статус реликтового пространства от растаявших ледяных кристаллов, в массе которых обычно расцеляны криоминеральный материал. Криогенные гипсовые кристаллы морфологически отличаются от некриогенных гипсовых микрообразований, связанных, например, с механическим дроблением (рис. 3-1) или выветриванием (рис. 3-2) сульфатных пород.

В криоматериале из пещер в известняках преобладают (рис. 4, 5-8) уплощенные сферолитовые образования с ровной поверхностью основания (рис. 4, 5-6) и развитым на ней (выросшим) неравномерно-мощным “слоем” расщепленных кристаллов (рис. 4, 7-8) На относительно крупных кристаллах (20-30 мкм) можно наблюдать грани минимум двух простых форм, представленных ромбоэдрами, на которых отмечаются рамочные (скелетные) и трансляционные формы, связанные с чередованием процессов роста-растворения.

Минералы, образованные в процессе криоминерогенеза, имеют небольшие размеры, характеризуются расщепленными формами, указывающими на неравновесные условия роста, их агрегаты *in situ* наследуют ячеистую структуру льда.

МЕХАНИЗМЫ СПЕЛЕОКРИОМИНЕРАГЕНЕЗА

Нарушение химического равновесия компонентов в растворе (его насыщение и перенасыщение) в случае криохимических процессов происходит при образовании ледяного натека и замерзании водного раствора.

Процесс, вызывающий убыль влаги (замерзание) и повышающий концентрацию растворенных веществ в растворе, имеет место в тонких (менее 1мм) пленках влаги, покрывающих ледяные образования. Охлаждение минерализованных вод происходит не мгновенно (в т.ч. из-за высокого содержания растворенных солей), а сравнительно постепенно. Замерзание (образование ледяных кристаллов) сопровождается переохлаждением жидкой фазы, формированием решетки ледяных кристаллов с “сотами”, в которых содержится переохлажденный остаточный раствор. Уменьшение размера сот, обусловленное ростом ледяных кристаллов, сопровождается повышением концентрации солей в остаточном растворе, что неизбежно приводит к кристаллизации минерального компонента. Кристаллизация происходит этапно: сначала происходит частичная кристаллизация льда, которая повышает концентрацию веществ в растворе, а затем, по мере насыщения раствора, дальнейшей кристаллизации H_2O сопутствует этапно-сингенетическое (кристаллизации льда) выпадение из раствора минералов. В случае сульфатно-кальциевых растворов (гипсовые пещеры) - гипса, а затем кальцита и целестина, а в случае гидрокарбонатно-кальциевых вод – разных фаз карбоната кальция. При данном механизме происходит последовательное “вмораживание” и “захоронение” в ледяной массе минерального компонента растворов в кристаллическом виде. Если подземная наледь увеличивает свои размеры, то в ней последовательно, слой за слоем, происходит накопление криовещества.

Теоретически, процесс кристаллизации растворенных компонентов может иметь место также при таянии ледяного образования и испарении влаги из раствора. Он предполагает кристаллизацию минералов из пленки, образующейся на поверхности тающих ледяных образований. В этом случае, повышение концентрации солей в растворе происходит вследствие испарения влаги. Однако, для его протекания необходимо повторное растворение криовключений, так как сама талая вода чрезвычайно бедна солями. На данном этапе исследований механизм этот не изучен. Предполагается, что при таянии льда скорее имеет место “подрастворение” криокристаллов (на что указывают формы растворения на их поверхности), но не полноценное формирование новых генераций. Подрастворение криоматериала наблюдается, в основном, в пещерах, где ледяные образования формируются сезонно (весной, когда температура воздуха повышается и начинается таяние подземных льдов).

“Освобождение” криоминеральных включений из “ледяного плена” происходит двумя путями: 1 – путем испарения льда, 2 – путем таяния льда. Первый заключается в том, что в определенных условиях (если влажность пещерного воздуха ниже 100%, при активном движении воздуха и т.д.), даже при нулевой или ниже температуре воздуха, пещерный лед может испаряться. При этом микроскопические кристаллы веществ, содержащихся во льду, механически освобождаются и выпадают из льда, оставаясь, в зависимости от формы ледяного тела, на его поверхности или сползая к его основанию. На горизонтальных или слабо наклоненных поверхностях пещерных ледников освободившиеся

частицы образуют мучнистый покров: поверхность льда при этом как бы “припудрена”. В случае больших уклонов или ледяных стен, выступающий со льда порошок осыпается, образуя у подножия ледяных тел скопления мучнистого материала.

Второй путь – через таяние – подразумевает механический переход кристаллических частиц из льда в пленку раствора, образующегося на поверхности ледяного тела вследствие его таяния. При этом может иметь место *вторичное растворение* (частичное или целиком, подрастворение) и *перекристаллизация* кристаллов, *агрегирование* частиц, *формирование сростков* кристаллов разного габитуса и генераций. Кристаллы могут нести на себе следы преобразования в новых (пленка талой испаряющейся влаги) условиях в виде полостей растворения, оплавленных граней и т.д. При длительном пребывании кристаллического материала в равновесно-неравновесных условиях (в пленке, пока не растает ледяное тело) могут возникать сложной формы агрегаты в виде “букетов”, живописных кристаллических нагромождений и т.д. Второй путь (таяние) характерен для пещер с сезонными ледяными образованиями. В связи с отмеченными обстоятельствами, криоматериал, собранный с (или на месте) сезонных ледяных образований отличается большим морфологическим разнообразием и весьма сложен в интерпретации.

Минералогия и морфология криоматериала из гипсовых и известняковых пещер

В гипсовых пещерах преобладающим минералом (более 95%) является гипс. Он образует в основном расщепленные, часто двойниковые, кристаллы и сферолиты (рис. 5, 1-4). Реже встречаются кальцит и целестин (рис. 5, 7-8) для которых также характерны расщепленные формы. В криоматериале из Кунгурской пещеры отмечены фазы SiO_2 (низкий тридимит ?). Минералогический спектр криоматериала известняковых пещер представлен почти исключительно различными фазами карбоната кальция (рис. 6).

Особую группу минералов в криоматериале образуют минералы-примеси (рис. 6, 7-8). Они выступают как отдельные кристаллы или в виде обломочных частиц. Минеральный спектр частиц достаточно разнообразен, но преобладают алюмосиликатные (пылевые) частицы. Аллохтонные примеси попадают в пещеры, главным образом, аэрозольным путем. По происхождению это – как естественные (органические и неорганические, в том числе – космические), так и техногенные частицы. Их содержание в пробах невелико (0-5%) и определяется условиями попадания аэрозоля в пещеру, а также – аккуратностью отбора проб.

ЗНАЧЕНИЕ СПЕЛЕОКРИОМИНЕРАГЕНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Несмотря на кажущийся частный, узкоспециальный характер, изучение криоминеральных образований пещер имеет важное научное значение, выходящее за рамки спелеологических исследований (Андрейчук, Галускин, 2001):

Во-первых, минеральные новообразования во льдах, генетически связанные с криохимическими процессами, изученными еще слабо. В пещерах, к тому же, в отличие от наземных льдов, мы часто

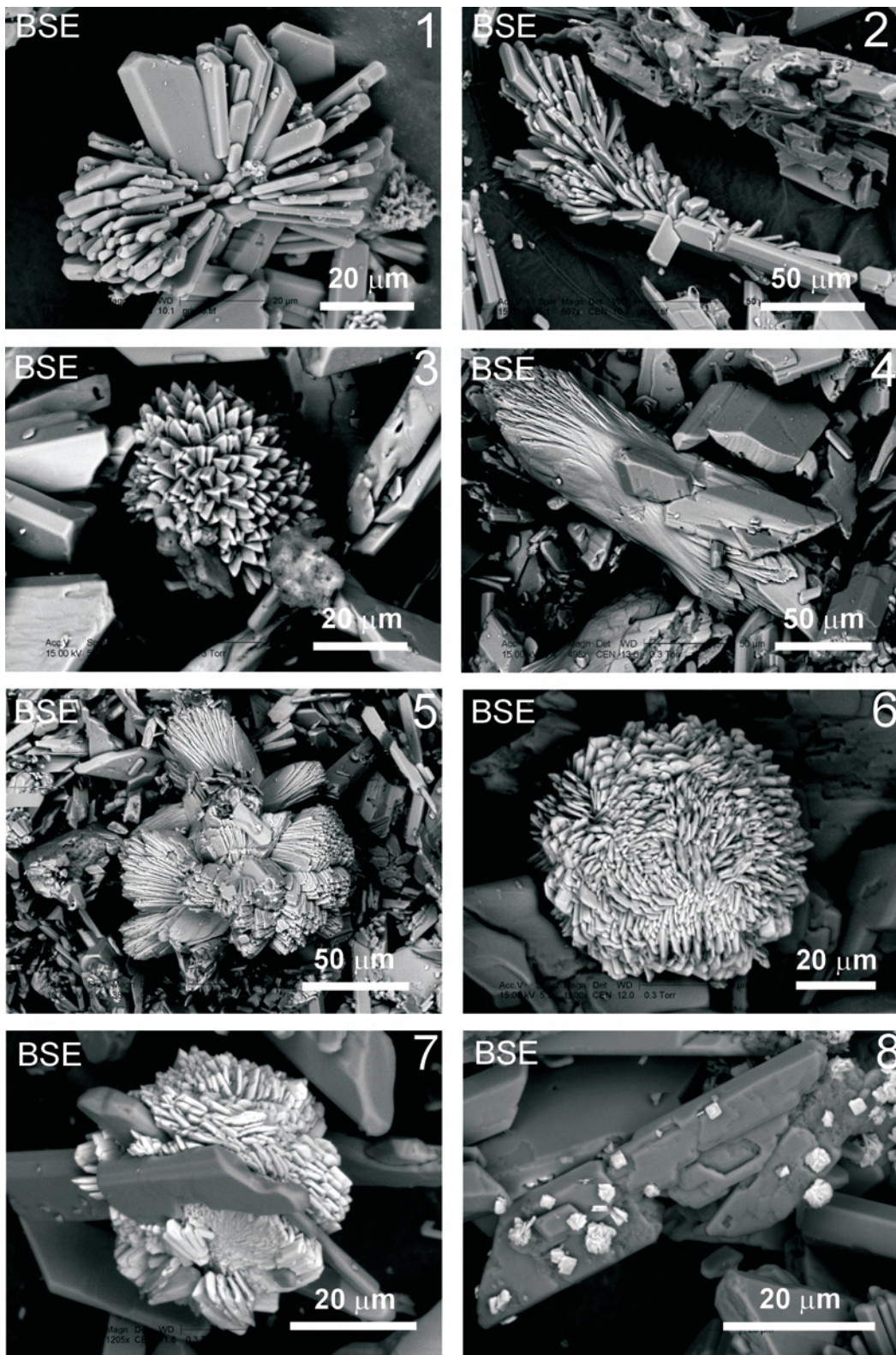


Рис. 5. Характерные криоминеральные образования из гипсовой муки (гипсовая пещера Кунгурская): 1, 2 = гипс, 3-5 = кальцит, 6-8 = целестин.
Fig. 5. Characteristic cryomineral formations of gypsum powder (Kungur gypsum cave): 1, 2 = gypsum, 3-5 = calcite, 6-8 = celestine.

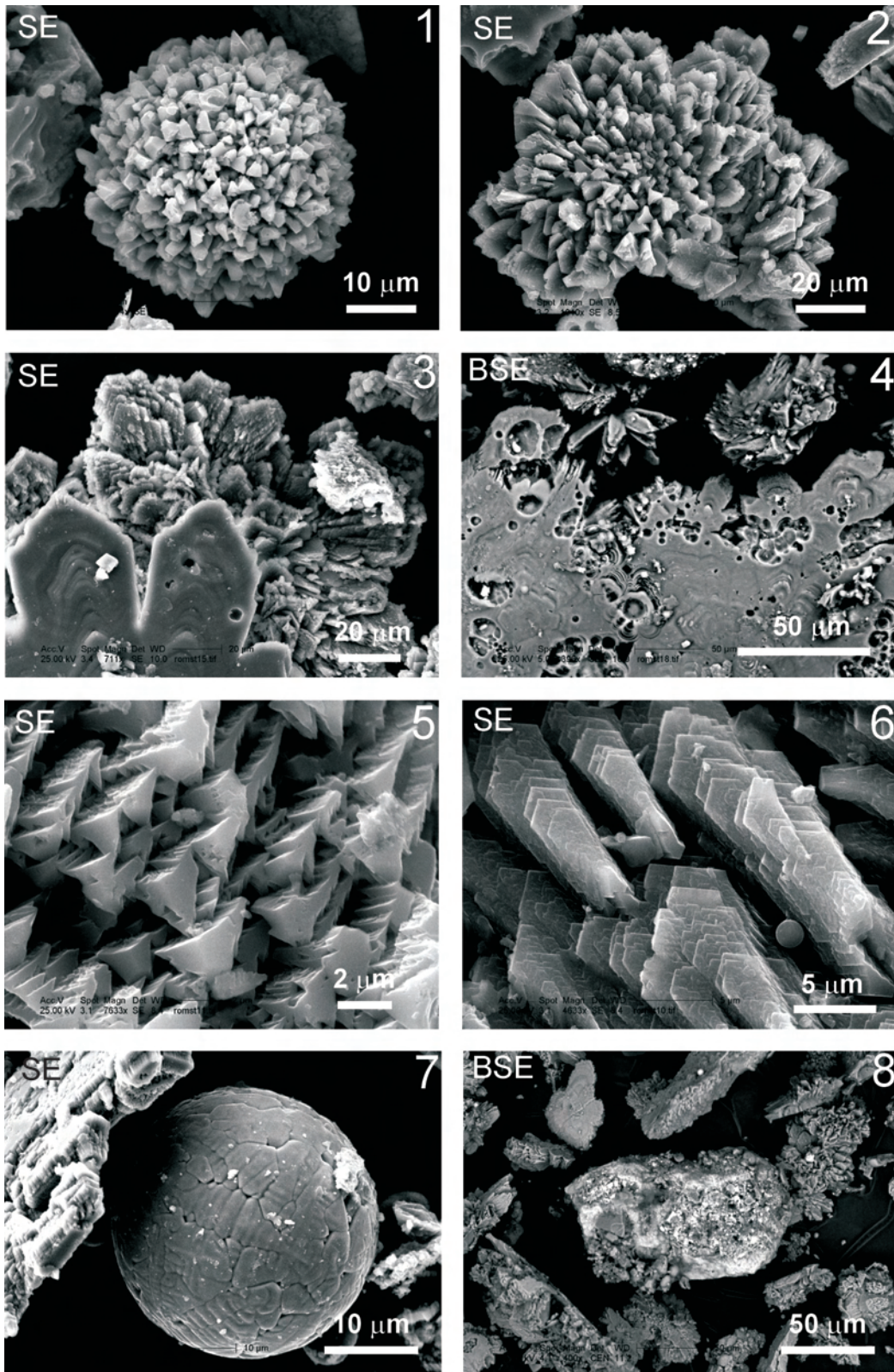


Рис. 6. Характерные криоминеральные образования из кальцитового порошка (пещера в известняках - Скершишоара): 1-6 = кальцит; 7, 8 – примеси. 1, 2 = расщепленные сферолитовые агрегаты кальцита, 3, 4 = вид кальцитовых агрегатов снизу с видимыми зонами роста (3) и коррозионными (?) углублениями (4); 5, 6 = «головы» кальцитовых сферолитов крупным планом (величина кристаллов – до нескольких микрон) со следами вторичного растворения на контактах кристаллов, 8 = магнетитовый сферолит, 8 = алюмосиликатная частичка.

Fig. 6. Characteristic cryomineral formations of calcite powder (limestone cave – Skerishoara): 1-6 = calcite; 7, 8 = admixtures. 1, 2 = split spherulitic aggregates of calcite; 3, 4 = calcite aggregates (bottom view) with visible growth zone (3) and corrosion (?) micro-depressions (4); 5, 6 = tips (“heads”) of calcite spherules in big scale (size of crystals - some microns) with traces of solution on the crystal's contact; 7 = spherule of magnetite, 8 = aluminosilicate particle.

имеем дело со льдами с повышенной минерализацией (до 1-2 г/л), т.н. солоноватыми (по Дублянскому и др., 1992) или солеными (по Максимовичу, 1947) льдами. Мавлюдов (1989) делит пещерные снежно-ледовые образования по количеству содержащихся в них солей на пресные – до 1000 мг/л, солоноватые – 1000-5000 мг/л и – соленые - более 5000 мг/л. Пещерные льды обогащены, таким образом, по сравнению с наземными льдами, минеральным компонентом и предоставляют, поэтому, хорошие возможности для проведения соответствующих вещественных исследований.

Во-вторых, не выяснены как следует формы нахождения и морфология минеральных примесей в пещерных льдах. Выяснение этого вопроса могло бы дать ключ к расшифровке их генезиса и, тем самым, расширить наши представления о слабо изученных (но очень распространенных) криохимических процессах, их следствиях и эффектах.

В-третьих, обогащенность подземных льдов солями предопределяет формирование при их вытаивании своеобразных типов пещерных отложений, что также представляет самостоятельный - седиментологический интерес.

В-четвертых, выявление у минеральных новообразований криогенетических признаков (морфологических, типологических и др.) позволило бы осуществлять палеогляциологические реконструкции, т.е. говорить, в том или ином случае, об имевшем место подземном оледенении.

Проведенные к настоящему времени исследования свидетельствуют о том, что криогенетические процессы и сопутствующее им формирование (вымораживание) минеральных образований широко распространены в пещерах (а также трещинах и пустотах) умеренной зоны, а также высокогорий. Естественно, еще более активны эти процессы в холодном поясе, в субполярной и полярной зонах. Можно предполагать, что в результате криогенетического “осадкообразования” значительная часть растворенных в воде (вследствие карстовых процессов) минеральных веществ извлекается вымораживанием из циркулирующих в карстовых массивах вод и осаждаются на стенах и в днищах пещер, обогащая пещерные отложения карбонатным и (или) сульфатным компонентами, а также участвуя в дальнейшем спелеоминералогенезе.

Неясно какой масштаб имеет вымораживание минерального компонента из карстовых вод холодных областей. Может, однако, оказаться, что явление это настолько существенно, что требует пересмотра или корректировки ряда устоявшихся в карстведении воззрений, например о низкой интенсивности *карстовой (химической) денудации* в холодных регионах. Последняя традиционно исчисляется на основании данных о выносе растворенных веществ (реками) и естественно не учитывает криосоставляющую – вымороженную минеральную массу, оставшуюся в карстовых массивах – в пещерах, трещинах и подземных полостях. Это значит, что получаемые данные о химической денудации в полярных или высокогорных областях обычно занижены. Фактическая денудация (т.е. активность карстовых процессов) может быть больше. Насколько – покажут дальнейшие исследования.

Изучение криоминеральных образований, в том числе – отложений, имеет большое *седиментологическое и минералогическое значение*. Например, проблема криообогащения пещерных отложений дисперсными карбонатами и сульфатами, роль криоматериала при образовании других типов пещерных отложений (натёков, лунного молока), криоматериала как источника цемента при формировании карстовых брекчий и т.д. С криоминералогенезом можно связывать образование ряда загадочных минеральных форм, например, известных „гипсовых ежей” из пинежских пещер. По мнению авторов, на самое серьезное внимание заслуживает гипотеза о формировании ежей в глинах (там их и находят) на месте сезонно тающих ледяных образований (колонн, сталагмитов), где субстрат обогащен криогенным гипсом. Растворенный талыми (капающими) водами криогипс, в более теплых и сухих условиях (летом, или осенью, например) кристаллизуется, образуя однолетние или многолетние (более сложные) сферолитовые сростки кристаллов, т.е. - гипсовые ежи пинежских пещер – стадия агрегации криохимического гипса, попадающего в отложения.

Несомненно, со временем удастся выявить и описать множество переходных кристаллических фаз и образований, представляющих собой “эволюционные ряды” превращения-перекристаллизации исходного криоматериала в различные кристаллические формы. Это весьма интересная тема минералогических исследований, которую можно реализовать на базе холодных пещер-полигонов типа Кунгурской, пещер Пинежья и др. Похоже, что морфокристаллическое разнообразие вторичных гипсов упомянутых пещер, что является фактом (см. Молоштанова и др., 2001), связано именно с процессами криоминералогенеза. В этом отношении, холодные гипсовые пещеры могут быть противопоставлены (сравнены и т.д.) теплым гипсовым пещерам аридных регионов (Средняя Азия, юго-запад США, Испания и т.д.), также отличающимся большим разнообразием гипсо-минеральных форм. Но причина разнообразия здесь иная – в сравнительно высокой температуре воздуха, ее колебаниях и широком распространении процессов конденсации-испарения.

Весьма интересным для разработки вопросом является также *возраст* криоминеральных образований. Их датирование (в случае значительных скоплений материала – как в Скершоаре, например, или в других пещерах с многолетними наледями) могло бы безошибочно указывать на возраст подземного оледенения, т.е. криоминералы могут служить своего рода возрастными маркерами, более устойчивыми, чем лед, который может подтаивать, перекристаллизовываться и т.д.

В подземных наледях, нарастающих слой за слоем, среди криоминеральных образований “консервируется” аэрозольный материал, в том числе частицы, принесенные воздушными потоками снаружи. Они также могут служить *источником информации*: о палеоклиматических условиях прошлого (например, сухих периодах с пыльными бурями), имевших место катастрофах (например, вулканических извержениях, падениях крупных космических тел и т.д.), эволюции антропогенного (техногенного) воздействия на среду и т.д.

Естественно, наибольший интерес для науки представляют пещеры с многолетними ледяными образованиями и значительными скоплениями криоминеральных масс. К таким пещерам можно отнести Кунгурскую, Скершоару, Айсризенвельт, Добшинскую, Аскинскую и многие другие.

Большое самостоятельное значение имеют *физико-минералогические аспекты* криогенеза. Пещерный криоматериал очень разнообразен по своему составу и морфологии, отражающей не только разнообразие механизмов формирования, но и действие множества факторов в неравновесных условиях раствора и изменчивых условиях пещерной среды. Тонкие минералогические исследования с использованием наиболее современных методов, в т.ч. изотопного анализа, несомненно позволят выявить неизученные до сих пор эффекты и явления, сопровождающие холодный минерогенез. Весьма интересны последовательность кристаллизации минералов, скорость процесса, криоморфные превращения кристаллов минералов в окружении ледяных кристаллов (рекристаллизующихся в меняющихся условиях среды), включения в криокристаллах (например, воды, других минералов), фазовые превращения минерального вещества, его агрегация, структура кристаллов (зоны роста и т.д.) и многие другие вопросы.

Минералогические исследования пещерных льдов должны «идти в паре» с изучением собственно пещерных льдов или шире – снежно-ледовых образований пещер: их формирования, типологии, преобразования под действием различных факторов и т.д. При этом, следует опираться на уже существующие их классификации и описания. Наиболее обстоятельные из них разработаны Б.Р. Мавлюдовым (2001). Требуется изучения вопрос площадного и объемного распределения минерального компонента в ледяных образованиях, т.е. минеральная дифференциация, стратификация подземных ледничков и образований. Б.Р.Мавлюдовым, например, в Кунгурской пещере установлен (1989) факт более высокой минерализации краевых частей ледяных сталагмитов по сравнению с центральной, осевой их частью. В.Н.Дублянский и А.А.Ломаев (1980) отмечают возрастание минерализации снега и льда от поверхности к днищам колодцев со снежниками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как следует из проблемно-постановочного обзора, каковым является настоящая статья, *криоминералогия пещер* – зарождающееся научное направление на стыке спелеологии, минералогии и геокриологии (геометеорологии). Оно находится на начальном этапе своего развития – этапе сбора и накопления данных. Это, собственно, и является его главной задачей на ближайшее время. Анализ как можно большего количества данных, как аналитических (изучение материала под микроскопом), так и данных непосредственных наблюдений (в том числе – микроклиматических) под землей позволит глубже понять условия и механизмы формирования криоминеральных включений, выяснить масштаб криоаккумуляционных процессов, разработать вопрос о их индикационном значении, а также ответить на целый ряд «смежных» вопросов.

Из сказанного вытекает еще один важный вывод – о большом природоохранном значении пещер с многолетними, и даже – сезонно-образующимися льдами. К счастью, первые, как правило, являются объектами охраняемыми, но – далеко не все, особенно в высокогорных районах. В отдельных случаях, на природоохранный статус заслуживают и пещеры с сезонным оледенением, а также искусственные полости (штольни и др.), в привходовых частях которых образуется или накапливается лед. Во всяком случае, при рассмотрении вопросов о заповедании пещер следует принимать во внимание еще один – криоминералогический критерий.

ЛИТЕРАТУРА

Алексеев В.Р. Наледи. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1987. – 254 с.

Алексеев В.Р., Иванов А.Б. Криогенная метаморфизация природных вод и ее роль в круговороте веществ // Доклады Института географии Сибири и Дальнего Востока. – 1976. – Вып. 46. – С. 31-40.

Андрейчук В.Н. Некоторые своеобразные отложения в Кунгурской пещере, связанные с ее оледенением // Минералы и отложения пещер и их практическое значение. – Пермь, 1989. – С. 22-23.

Андрейчук В., Галускин Е. Криогенные минеральные образования Кунгурской ледяной пещеры // Пещеры. – Пермь, 2001. – Вып. 27-28. – С. 108-116.

Андрейчук В., Галускин Е., Ридуш Б. Криогенні мінеральні утворення з гіпсових печер Буковини // Науковий Вісник Чернівецького університету. Збірник наукових праць, 2004. – Вип. 220, Географія. – С. 24-41.

Горбунова К.И., Молоштанова Н.Е., Максимович Н.Г. Экзогенное минералообразование в Кунгурской пещере // Публикации Лаборатории ГТП при Естественнонаучном институте ПГУ. – 2004.

Дублянский В.Н., Ломаев А.А. Карстовые пещеры Украины. – Киев: Наук. думка, 1980. – 180 с.

Дублянский В.Н., Андрейчук В.Н., Берсенев Ю.И., Дублянская Г.Н., Цыкин С.Г., Малков В.Н., Филиппов А.Г., Цыкин Р.А. Химический состав льдов из карстовых пещер СССР // Изучение и использование карста Западного Кавказа. Тез. докл. – Сочи, 1991. – С. 70-72.

Дублянский В.Н., Андрейчук В.Н., Берсенев Ю.И. и др. Химический состав льдов карстовых полостей // Инженерная геология. – Москва, 1992. – Вып. 5. – С. 119-123.

Дублянский В.Н., Андрейчук В.Н., Берсенев Ю.И., Дублянская Г.Н., Малков В.Н., Филиппов А.Г., Цыкин Р.А. Химический состав льдов карстовых полостей // Свет. Вестник Киевского карст.-спел. центра. – Киев, 1992. – № 2(4). – С. 5-6.

Иванов А.В. Проблемы исследований физико-химических процессов наледеобразования // Наледи Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск: Наука, 1981. – С. 176-185.

Иванов А. В. Гидрохимические процессы при наледеобразовании. – Владивосток: Изд-во АН СССР, 1983. – 108 с.

Каракаш Н.И. Кунгурская ледяная пещера на Урале // Тр. СПб. Общ. естествоисп. – 1905. – Т. XXXV1. – Вып. 1. – С. 11-24.

Мавлюдов Б.Р. Оледенение пещер Советского Союза: Дисс. ... канд. геогр. наук. – Москва, 1989. – 196 с.

Мавлюдов Б.Р. Классификация снежно-ледовых образований пещер // Пещеры. – Пермь, 2001. – С. 97-107.

Максимович Г.А., Кобяк Г.Г. Характеристика льда Кунгурской

- пещеры // Доклады АН СССР. – 1941. – Т. 31. – № 5. – С. 478-481.
- Максимович Г.А. Пещерные льды // Известия Всес. геогр. об-ва. – 1947. – № 5. – С. 537-549.
- Максимович Г.А., Панарина Г.Н. Химический состав пещерных озер и льда // Химическая география и гидрогеохимия. – 1967. – Вып. 4. – С. 98-103.
- Молоштанова Н.Е., Максимович Н.Г., Назарова У.В. Минеральный состав отложений Кунгурской ледяной пещеры // Пещеры. – Пермь, 2001. – С. 116-128.
- Åkerman, J. Studies on naledi (icings) in Western Spitsbergen // Hydrology in the Permafrost Regions: Proc. 4th Can. Permafrost Conf. – 1982. – P. 198-202.
- Andrejchuk V., Galuskin E., Ridush B. Cryomineral formations from North Bukovinian Caves // 1st International Workshop on Ice Caves: Volume of abstracts. – 2004. – P. 36-37.
- Andrejchuk V., Galuskin E., Perşoiu A. Cryomineral formations of Scărișoara Cave (Romania) // Glacier cave and Glacial Karst in High Mountains and Polar Regions. – Moscow: Publ. of Russian Academy of Sciences, Institute of Geography, 2005. – P. 85-86.
- Kostrzewski A., Zwoliński Z. Udział denudacji chemicznej i mechanicznej we współczesnym systemie geomorficznym górnej Parsęty (Pomorze Zachodnie) // A. Kotarba (ed.). System denudacyjny Polski. Prace Geogr. – IG i PZ PAN, 1992. – S. 11-45.
- Bukowska-Jania E. Rola systemu lodowcowego w obiegu węglanu wapnia w środowisku przyrodniczym (na przykładzie Svalbardu i młodoglacialnych obszarów Polski północno-zachodniej). – Katowice: W-wo Uniwersytetu Śląskiego, 2003. – 247 s.
- Bukowska-Jania E. Rola lodu nalodziowego we wzbogacaniu osadów proglacialnych w węglan wapnia (na przykładzie Lodowca Werenskioldta, SW Spitsbergen) // III Seminarium nt.: „Geneza, litologia i stratygrafia utworów czwartorzędowych”, Poznań, 16-17 listopad 1998 / Red. A. Kostrzewski – Poznań: Instytut Badań Czwartorzędu UAM, 1998. – S. 30-32.
- Bukowska-Jania E., Pulina M. Calcium carbonate in deposits of the last Scandinavian glaciation and contemporary chemical denudation in western Pomerania – NW Poland, in light of modern processes in Spitsbergen // Z. Geomorph. N.F. – Berlin - Stuttgart, 1999. – Vol. 119. – P. 21-36.
- Clark I.D., Lauriol B. Kinetic enrichment of stable isotopes in cryogenic calcites // Chem. Geol. – 1992. – Vol. 102. – P. 217-228.
- Courty M.A., Marlin C., Dever L., Tremblay P., Vachier P. The properties, genesis and environmental significance of calcitic pendants from the high arctic (Spitsbergen) // Geoderma. – 1994. – Vol. 61. – P. 71-102.
- Drozdowski E. Calcite deposit precipitated during formation of icings // Acta Universitatis Wratislaviensis. – Wrocław, 1982. – Vol. 525. – P. 39-48.
- Fairchild I.J., Bradby L., Spiro B. Carbonate diagenesis in ice // Geology. – 1993. – Vol. 21. – P. 901-904.
- Fairchild I.J., Bradby L., Spiro B. Reactive carbonate in glacial systems: a preliminary synthesis of its creation, dissolution and reincarnation // Earth's Glacial Record / Eds. M. Deynoux, J.G. Miller, E. Domack, N. Eyles, I.J. Fairchild and G.M. Young. – Cambridge University Press, 1994. – P. 176-192.
- Fairchild I.J., Killawee J.A., Spiro B., Tison J.-L. Calcite precipitates formed by freezing processes: kinetic controls on morphology and geochemistry // Proc. Fourth Internat. Symp. on the Geochemistry of Earth's Surface, Ilkley, England. – University of Leeds. – 1996. – P. 178-183.
- Fairchild I.J., Killawee J.A., Sharp M.J., Spiro B., Hubbard B., Lorrain R.D., Tison J.-L. Solute generation and transfer from chemically reactive alpine glacial-proglacial system // Earth Surf. Process. Landforms. – 1999. – Vol. 24. – P. 1189-1211.
- Faure G., Hoefs J., Jones L., Curtis J., Pride D. Extreme ¹⁸O depletion in calcite and chert clasts from the Elephant Marine on the East Antarctic ice sheet // Nature. – 1988. – Vol. 332 (24). – P. 352-354.
- Ford D.C., Fuller P.G., Drake J.J. Calcite precipitates at the soles of temperature glaciers // Nature. – 1970. – Vol. 226 (5244). – P. 441-442.
- Galuskin E., Bukowska-Jania E. Morfologia i geneza kalcytu kriogenicznego // Materiały konferencyjne XIX Szkoły Terenowej Geologów Uniwersytetu Śląskiego. – Sosnowiec, 1999. – P. 6-12.
- Gokhman V.V. Distribution and conditions of formation of glacial icings on Spitsbergen // Polar Geography and Geology. – V.H. Winston & Sons Inc., 1997. – Vol. 11. – P. 249-260.
- Grasby S.E. Naturally precipitating vaterite (μ-CaCO₃) spheres: unusual carbonates formed in an extreme environment // Geochim. Cosmochim. Acta. – 2003. – Vol. 67. – P. 1659-1666.
- Griselin M., Marlin Ch. Origin of water circulation in the moraine plain of Loven East Glacier (Spitsbergen) // Salzburger Geographische Materialien (4th Symposium on Glacier Caves and Cryokarst in Polar and High Mountain Regions). – Rudolfshutte, Salzburg, 1998. – Vol. 28. – P. 61-71.
- Hallet B. Subglacial regelation water film // J. Glaciol. – 1979. – Vol. 23 (89). – P. 39-50.
- Jazuel J., Souchez R.A. Melting-refreezing at the glacier sole and the isotopic composition of the ice // J. Glaciol. – 1982. – Vol. 28. – P. 35-42.
- Killawee J.A., Fairchild I.J., Tison J.L., Janssens L., Lorrain R. Segregation of solutes and gases in experimental freezing of dilute solutions: implication for natural glacial system // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1998. – Vol. 62. – P. 3637-3655.
- Pulina M. The effects of the cryochemical processes in the glacier and permafrost in Spitsbergen // Polar Res. – 1984. – Vol. 5 (3-4). – P. 137-163.
- Pulina M. Geomorphological effects of the cryochemical process // Quest. Geogr. – Poznań, 1990. – Vol. 13/14 (1987/1988). – P. 99-112.
- Souchez R.A., Lemmens M. Subglacial carbonate deposition – an isotopic study of a present-day case // Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology. – Amsterdam, Elsevier Science Publishers B.V., 1985. – Vol. 51. – P. 357-364.
- Szumskij P.A. Osnovy strukturalnogo ledowjedienija. – Moskwa: Izd. AN SSSR, 1955. – 492 p.
- Žák J., Urban V., Cilek V., Hercman H. Cryogenic cave calcite from several Central European caves: age, carbon and oxygen isotopes and a genetic model // Chemical Geology. – 2004. – Vol. 206. – P. 119-136.
- Vogt T., Corte A.E. Secondary precipitates in Pleistocene and present cryogenic environments (Mendoza Precordillera, Argentina, Transbaikalia, Siberia, and Seymour Island, Antarctica) // Sedimentology. – 1996. – Vol. 43. – P. 53-64.