

**КРИОГЕННЫЕ МИНЕРАЛЬНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ
КУНГУРСКОЙ ЛЕДЯНОЙ ПЕЩЕРЫ.
ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И СВЯЗЬ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ С МИКРОКЛИМАТОМ**

С. С. Потапов¹, А. Т. Титов²

¹ – *Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс, spot@ilmeny.ac.ru*

² – *Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск, titov@uiggm.nsc.ru*

Продолжены исследования в рамках относительно новых и слабо разработанных направлений минералогической науки – спелеоминералогии и криоминералогенеза [Потапов и др., 2006]. Ранее нами были изучены криогенные минеральные образования в пещерах Пинежья [Потапов и др., 2008], современные эфемерные минеральные образования в Кунгурской ледяной пещере и криогенные формы гипса в Октябрьских пещерах [Потапов, Титов, 2009]. Настоящие исследования посвящены изучению криогенного гипса в Кунгурской ледяной пещере [Потапов, 2010].

В карстовых пещерах с ледяными образованиями при таянии или сублимации (возгонке) льда образуются остаточные порошкообразные отложения, образно называемые пещерной (гипсовой, минеральной, горной) мукой. Некогда законсервированные во льду и высвобождающиеся при его возгонке (испарении, сублимации) микрокристаллы криогенных минералов образуют светлый мучнистый налет. *Пещерная (горная, минеральная, гипсовая) мука – рыхлая порошковатая субстанция белого, серого, желтого цвета, сложенная криогенными минералами и высвобождающаяся на поверхности пещерного льда при его сублимации или таянии.* При намерзании ледяных форм в пещерах в условиях отрицательных температур, растворенные в замерзающей воде минеральные компоненты кристаллизуются и консервируются льдом. Поскольку формирование кристаллов минералов сопряжено с образованием льда, то их и называют криогенными (от греческих слов «kryos» – холод, мороз, лед и «genesis» – зарождение, происхождение, развитие).

Вообще, криогенные минеральные образования известны во многих пещерах с ледяными образованиями, и мы отнюдь не являемся их первыми исследователями. На современном этапе и на современном методическом и инструментально-аналитическом уровне на примере Кунгурской ледяной пещеры и пещер Буковины исследованием криогенных минеральных образований успешно занимается коллектив в составе В. Андрейчука, Е. Галускина и Б. Ридуша. Что касается Кунгурской ледяной пещеры, то, пожалуй, первым, кто обратил внимание на мелкие кристаллы гипса, покрывающие поверхность льда, был археолог И. С. Поляков еще в конце XIX века. А кристаллограф Е. С. Фёдоров связал их возникновение с таянием или испарением льда. Кристаллизация гипса из минерализованных вод начинается с понижением температуры за счет резкого снижения растворимости гипса при низких температурах. При этом происходит вымораживание минеральных солей из воды и выпадение их в виде твердой кристаллической фазы.

По нашим наблюдениям, в Кунгурской ледяной пещере криогенный гипс встречается в гротах *Бриллиантовый, Полярный, Данте, Западный, Крестовый, Грозный, Скульптурный, Великан, Вышка* и в ходе *Горе Толстякам*, где развиты образования многолетнего и сезонного льда (рис. 1), что соответствует двум микроклиматическим зонам – зоне постоянных отрицательных температур и переходной температурной зоне. Нами предполагается возможность формирования криогенного гипса и в *Скандинавском* гроте. Развитие криогенных минеральных образований напрямую связано с микроклиматическими особенностями, которые для Кунгурской пещеры весьма сложны.



Рис. 1. Схема Кунгурской ледяной пещеры. Звездочками показаны места с находками криогенного гипса.

По О. И. Кадебской, в пещере от входа до так называемой «нейтральной зоны» с практически постоянными температурами, формируется несколько климатических зон: выравнивающая, зона отрицательной температурной аномалии, переходная зона и собственно нейтральная зона. В зоне отрицательной температурной аномалии присутствует постоянное оледенение, а в переходной зоне – сезонное оледенение. Режим охлаждения в пещере искусственно зарегулирован. Граница постоянного оледенения в пещере проходит вдоль северной периферии Крестового грота и восточной периферии Западного грота (около 200 м от входа), а граница сезонного оледенения – по гротам Морское Дно, Геологов и Смелых (рис. 2). При интенсивном проветривании пещеры зимой граница сезонного оледенения может перемещаться вглубь пещеры вплоть до грота Метеорного. Как видно на рисунке 1 по распространению криогенных образований гипса по гротам пещеры, зафиксированному нами за последние 2–3 года, действительно, граница сезонного оледенения существенно сместилась вглубь пещеры, к северу, и проходит вдоль линии, соединяющей грот Великан с южной частью грота Метеорного. С учетом наличия в пещере различных микроклиматических зон можно сделать вывод, что в зоне развития постоянного оледенения высвобождение криогенного гипса из толщи льда происходит при его сублимации, а в зоне развития сезонного оледенения – как за счет сублимации в зимне-весенний период, так и за счет полного таяния льда в летний период.

В мае 2008 г. во время экскурсии в Кунгурскую ледяную пещеру в рамках международного симпозиума по пещерам с ледяными образованиями были отобраны пробы криогенного гипса из нескольких гротов пещеры. Все отобранные пробы пещерной муки представляют собой рыхлую порошокатую субстанцию от белого до серого цвета. Некоторые пробы содержат глинистую составляющую и другой аллохтонный материал,

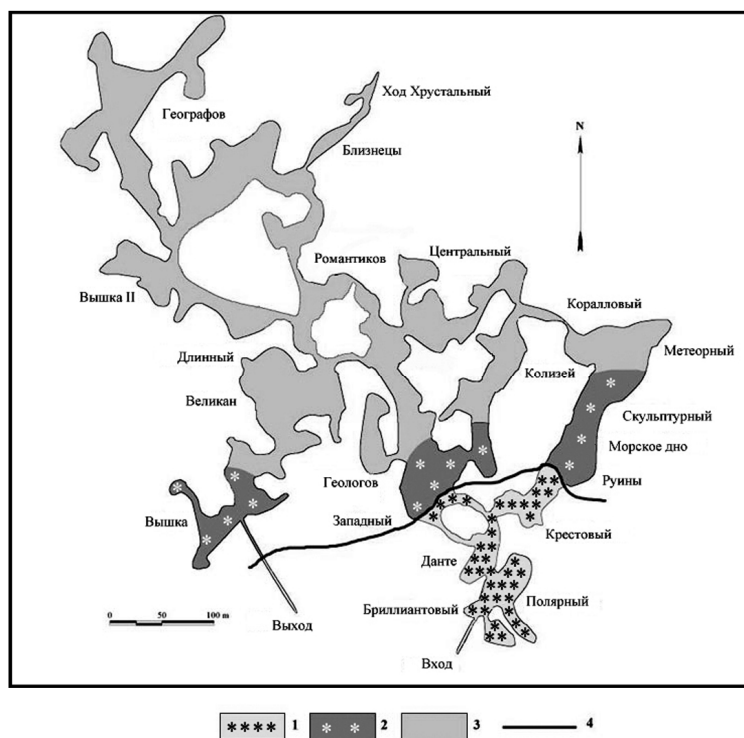


Рис. 2. Распределение микроклиматических зон в Кунгурской ледяной пещере по О. И. Кадебской: 1 – зона постоянных отрицательных температур, 2 – переходная зона, 3 – нейтральная зона с практически постоянными температурами, 4 – граница распространения многолетнего оледенения.

загрязняющий пробы. Минералогический анализ (дифрактометр ДРОН-2.0, $\text{CuK}\alpha$ -излучение) всех проб муки показал, что основой её является гипс. Изучение морфологии кристаллов криогенного гипса из Кунгурской пещеры проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа LEO1430VP, снабженного энергетическим спектрометром «OXFORD». Методика исследований подробно описана в наших прежних работах [Потапов и др., 2008; Потапов, Титов, 2009].

В гроте Бриллиантовый были отобраны образцы гипса из ниш испарения многолетнего льда с мощными, в несколько сантиметров, отложениями криогенного гипса. Эти отложения, безусловно, накопились за несколько лет. Характер этих кристаллов гипса иллюстрирует рисунок 3. Отчетливо видно, что они многократно растворялись и вновь дорастали.

Следующая проба пещерной муки была отобрана на плоской горизонтальной поверхности наледи на полу слева (по ходу экскурсионного маршрута) от тропы в ходе Горе Толстякам (рис. 4а). Изображения кристаллов гипса, полученные с помощью электронного микроскопа, показаны на рисунке 4б–г. Это отдельные плоскогранные уплощенные таблитчатые кристаллы гипса, разнообразных сростки, вплоть до сферолитоподобных (рис. 4б), крупные (до 50 мкм) двойники гипса парижского типа (рис. 4в). Видно, что кристаллы полногранные, без следов растворения, «свежие», одного сезона накопления.

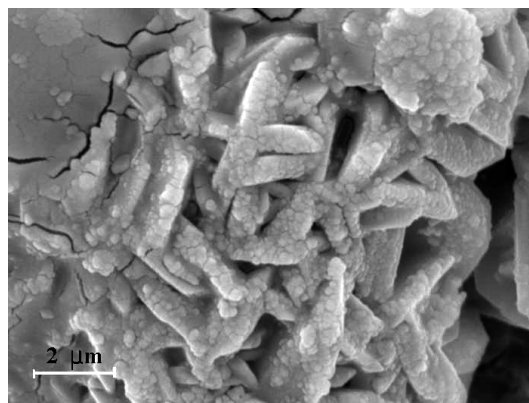


Рис. 3. СЭМ-фото кристаллов криогенного гипса из ниш испарения многолетней наледи в гроте Бриллиантовый.

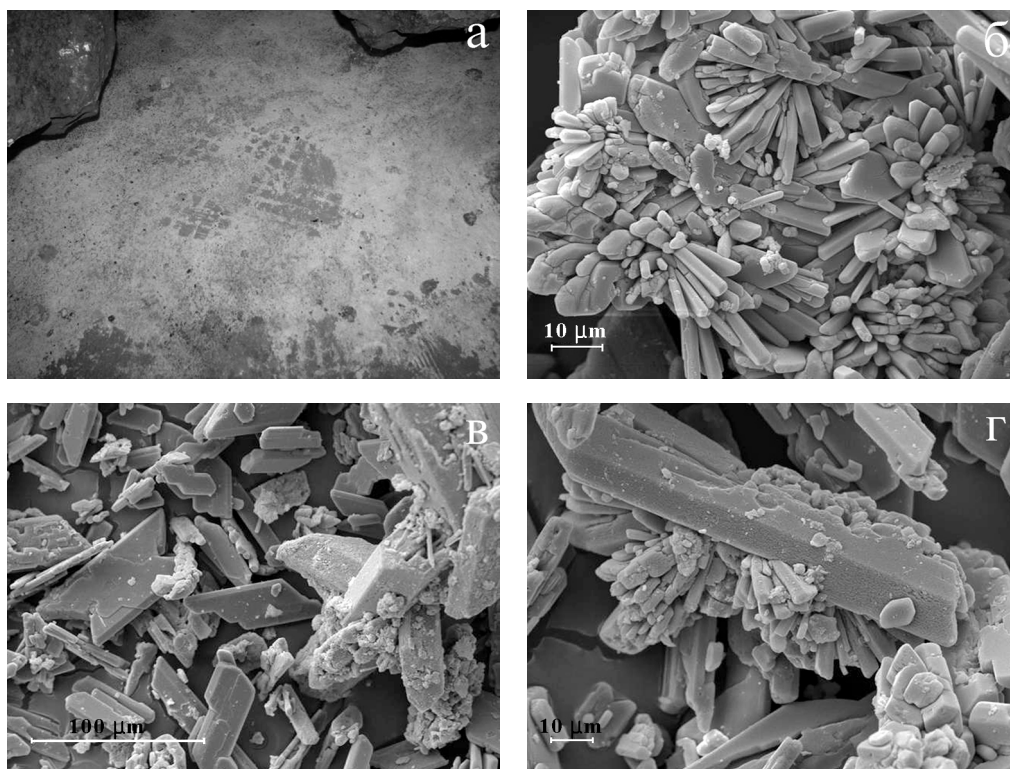


Рис. 4. Наледь на полу хода Горе Толстякам с покровом криогенного гипса (а) и вид этих кристаллов под электронным микроскопом (б–г).

В зоне постоянного оледенения пещеры, на ледяной многолетней колонне в ходе горе Толстякам отобрана еще одна проба (рис. 5а). Судя по морфологии поверхности (рис. 5б–г), это кристаллы многолетние со следами растворения и нарастания (обрастания). Встречаются реберные скелетные и футляровидные кристаллы.

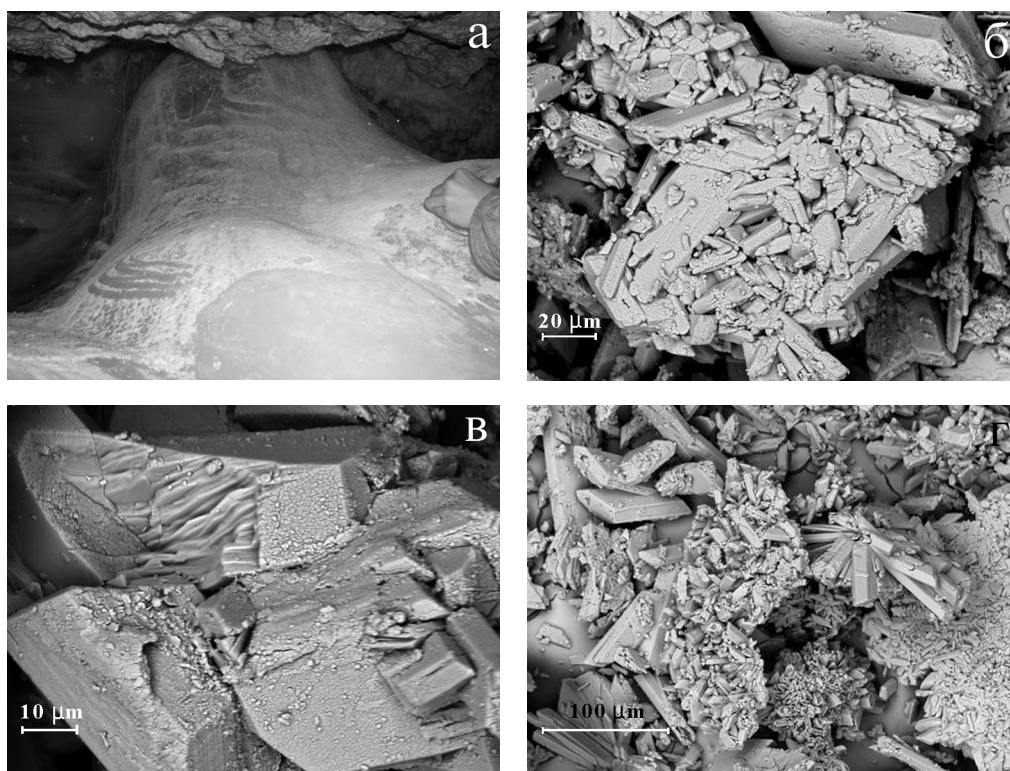


Рис. 5. Отложения криогенного гипса на ледяной многолетней колонне в ходе Горе Толстякам (а) и морфология поверхности кристаллов под электронным микроскопом (б–г).

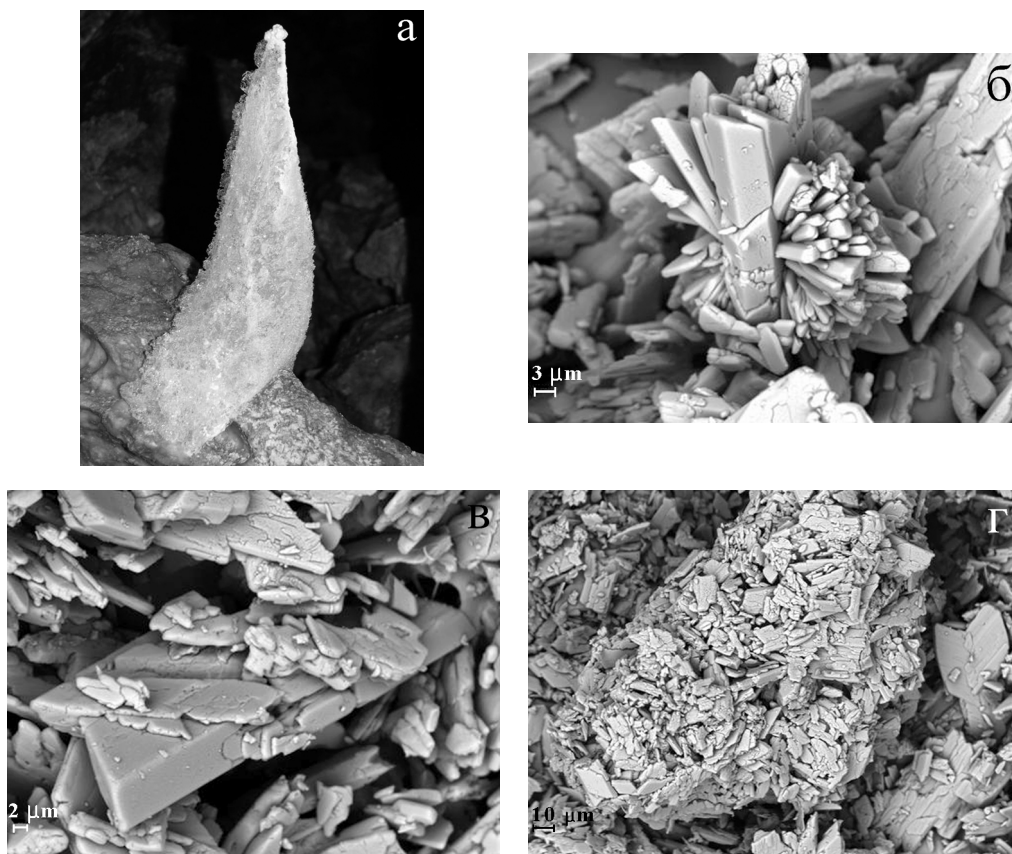


Рис. 6. Отложения криогенного гипса на вершине подтаявшего сталагмита в гроте Грозный в переходной температурной зоне (а) и вид этих кристаллов под электронным микроскопом: сложные сростки плоскогранных кристаллов (б), двойники парижского типа (в) и типа «ласточкин хвост» (с правой стороны снимка) (г).

В переходной микроклиматической зоне на вершине подтаявшего сталагмита в гроте Грозный обнаружено изометричное скопление криогенного гипса (рис. 6а). Это моносезонное образование, представленное сложными сростками (агрегатами) плоскогранных кристаллов (рис. 6б), двойников парижского типа (рис. 6в) и типа «ласточкин хвост» (рис. 6г).

При анализе СЭМ-фото криогенного гипса из Кунгурской ледяной пещеры, как и из других изученных нами пещер, не выявлено индукционных поверхностей совместного роста с другими минеральными фазами (льдом). Следовательно, кристаллы росли в свободном пространстве жидкой фазы (воды, раствора). Таким образом, кристаллы и их сростки образовались не синхронно (не одновременно) с кристаллизацией льда, а опережали его образование, и лишь впоследствии консервировались кристаллизующимся льдом. Несмотря на различие форм кристаллических агрегатов гипса, в целом можно выделить следующие общие особенности, характерные для криогенных образований гипсовой пещерной муки из разных пещер, в том числе, и из Кунгурской ледяной пещеры:

- развитие скелетных, реберных, футляровидных кристаллов;
- наличие двойниковых кристаллов, преимущественно двойников парижского типа, реже – двойников типа «ласточкин хвост».

Эти особенности отражают высокую скорость роста гипса при криогенезе.

Для Кунгурской ледяной пещеры характерны как моносезонные криогенные минеральные образования, так и многолетние их накопления. Различаются они по характеру поверхностей кристаллов и сростков. Многолетние накопления криогенного гипса характерны для зоны постоянных отрицательных температур, где сформировались многолетние льды. Здесь не происходит таяние льда, а высвобождение кристаллов гип-

са из его толщи осуществляется при сублимации, «сухом» испарении льда на токе воздуха, сразу из твердого состояния в газообразное, минуя жидкую фазу (воду). Эти относительно «сухие» условия являются благоприятными для накопления и длительного сохранения криогенного гипса. Но при длительном существовании в воздушно-влажной среде пещеры кристаллы гипса подрастворяются и снова обрастают на порядок меньшими кристаллами с формированием характерной «шагреновой» поверхности первичных кристаллов. В зоне же переходных температур, где развиты только сезонные ледяные образования, при полном таянии льда в летний период, кристаллы криогенного гипса либо остаются на грунте пещеры и впоследствии перемешиваются с почвой, с аллохтонными отложениями, дезинтегрируются и теряются, либо в более влажных условиях, в лужах, растворяются полностью. Поэтому в этой зоне переходных температур пещеры в весенний период можно найти только моносезонные кристаллы криогенного гипса идеальной формы с гладкими гранями.

Таким образом, Кунгурская ледяная пещера является подземной природной криолабораторией, где естественным путем кристаллизуются криогенные кристаллы гипса микронных размеров. В теоретическом (кристаллогенетическом) и практическом (лабораторный синтез микронных и наноразмерных кристаллов минералов для промышленных нужд) аспектах важно решить задачу влияния температуры вымораживания на размерные (морфометрические) параметры образующихся кристаллов. Решение этой задачи возможно лабораторным, экспериментальным путем.

Авторы благодарят: П. В. Хворова, Н. В. Паришину, Д. С. Потапова (Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс), В. И. Ракина (Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар) за выполнение рентгенофазового анализа, за консультации по кристалломорфологии и за техническую помощь в обработке и подготовке материала к исследованиям; В. Н. Андрейчука (Силезский университет, г. Сосновец, Польша) и О. И. Кадебскую (Горный институт УрО РАН, г. Пермь) за инициирование этой работы; А. И. Низовского (Институт катализа СО РАН, г. Новосибирск) за содействие в выполнении СЭМ-исследований.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 11-05-00452 по теме «Крио-минеральные образования в ледяных пещерах сульфатного и карбонатного карста: минералогия, морфология, генезис».

Литература

Потапов С. С., Паришина Н. В., Потапов Д. С., Кадебская О. И., Сивинских П. Н. Спелео-минералогия (на примере Кунгурской ледяной пещеры) // Теория, история, философия и практика минералогии: Материалы IV Международного минералогического семинара. 17–20 мая 2006 г. Сыктывкар: Геопринт, 2006. С. 71–74.

Потапов С. С., Паришина Н. В., Титов А. Т., Ракин В. И., Низовский А. И., Шаврина Е. В., Кадебская О. И. Крио-минеральные образования пещер Пинежья // Минералогия техногенеза-2008. Миасс: ИМин УрО РАН, 2008. С. 18–43.

Потапов С. С., Титов А. Т. Новые минералы Кунгурской ледяной пещеры и криогенное минералообразование в Октябрьских пещерах. Электронно-микроскопические исследования // Минералы: строение, свойства, методы исследования. Материалы Всероссийской молодежной научной конференции. Миасс: УрО РАН, 2009. С. 49–51.

Потапов С. С. Кунгурская ледяная пещера как природная криолаборатория по синтезу микронных кристаллов гипса // Карстовые процессы: закономерности развития, мониторинг, инженерно-геологические методы исследования. Материалы научно-практической конференции. 15–17 сентября 2010 г. Кунгур: ГИ УрО РАН, 2010. (В печати).

Потапов С. С. Криогенное минералообразование в Кунгурской ледяной пещере // Пещеры: сб. научн. тр. Пермь: Перм. гос. ун-т. 2010. Вып. 33. (В печати).