

---

---

**МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ**

---

---

**МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ОТЛОЖЕНИЙ ПЕЩЕРЫ ГРЕБНЕВСКАЯ,  
ИРКУТСКАЯ ОБЛАСТЬ**© 2022 г. Е. П. Базарова<sup>1</sup>, \*, О. И. Кадебская<sup>2</sup>, О. В. Коротченкова<sup>2</sup>, М. Н. Рубцова<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, ул. Лермонтова, 128, Иркутск, 664033 Россия<sup>2</sup>Горный институт УрО РАН, ул. Сибирская, 78-а, Пермь, 614007 Россия

\*e-mail: bazarova@crust.irk.ru

Поступила в редакцию 02.12.2021 г.

После доработки 21.04.2022 г.

Принята к публикации 14.06.2022 г.

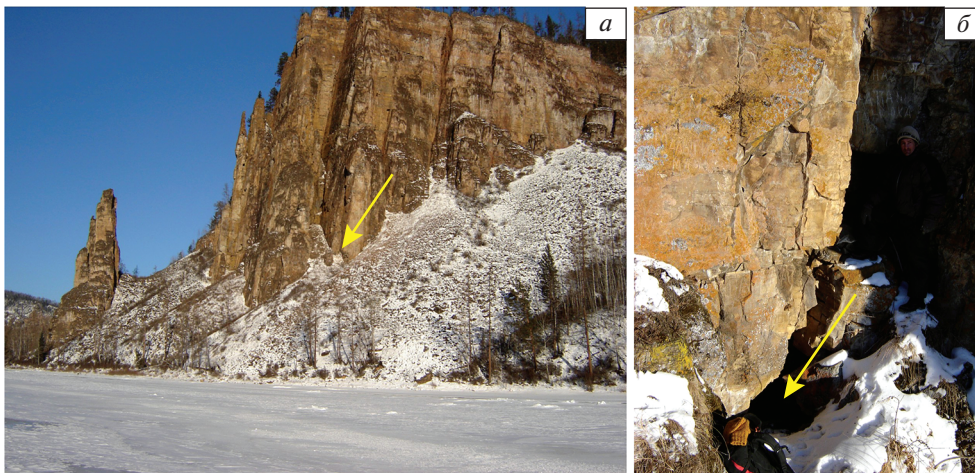
Изучен минеральный, химический и изотопный состав минеральных отложений пещеры Гребневская в Байкальском регионе. Особенностью минералогии этих отложений является слабое развитие кальцитовых и арагонитовых образований по сравнению с гидромагнезитом. Минеральные агрегаты, формирующиеся за счет притока воды (кальцитовые коры, пещерный “жемчуг”) обеднены магнием и характеризуются низкими значениями  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  по сравнению с отложениями, сформировавшимися при капиллярном питании (пещерная “пудра”) и криогенезе. Выявлены три этапа минералобразования, тесно связанные с климатическими условиями. На этапе обводненности пещеры были сформированы кальцитовые сталактиты и коры, а также арагонитовые агрегаты. При уменьшении водопитока и периодических понижениях температуры внутри пещеры до отрицательных значений образовались “жемчужины” режеляционного генезиса. Образование гидромагнезитовых и лансфордитовых отложений связано с современными процессами минералообразования.

*Ключевые слова:* пещера, криогенез, лансфордит, гидромагнезит

DOI: 10.31857/S0869605522040025

**ВВЕДЕНИЕ**

Подземные карстовые ландшафты характеризуются специфическими процессами минералообразования, которые тесно связаны с микроклиматическими обстановками внутри подземных полостей. Сформировавшиеся в ходе преобразования вмещающей породы отложения могут служить индикаторами микроклимата пещер, который, в свою очередь, контролируется климатическими условиями на поверхности. В Байкальском регионе в настоящее время известно более 300 пещер, многие из которых приурочены к литологически схожим породам, но расположены в различных географических зонах, что дает возможность проследить специфику минералообразования и выделить минеральные индикаторы для различных микроклиматических условий. Одной из крупнейших пещер Байкальского региона является пещера Гребневская. В статье рассматриваются отложения этой пещеры: минеральный, химический и изотопный состав, генезис и последовательность их формирования, а также зависимость минералообразования от микроклиматических условий. Исследование минералогии пещеры с применением современных аналитических методов проведено впервые.



**Рис. 1.** Утес, в основании которого расположена п. Гребневская (а); вход в пещеру (б). Автор фотографий А.Г. Докучаев.

**Fig. 1.** Cliff, at the base of which is the Grebnevskaya cave (a); the entrance to the cave (b). Photo by A.G. Dokuchaev.

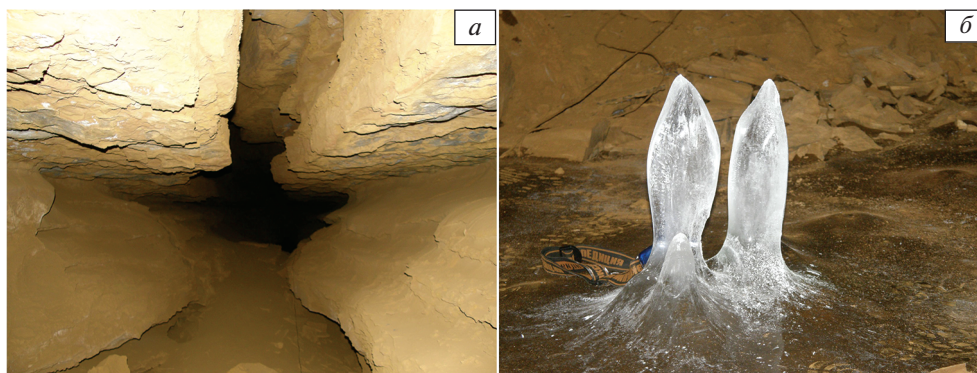
## ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

Пещера Гребневская является восьмой по длине пещерой Байкальского региона (Осинцев, 2010) и находится в Нижнеудинском районе на западе Иркутской области. Климат района резко континентальный, средняя температура января  $-20...-25$  °С, июля  $+15...+18$  °С (Объяснительная записка..., 2012). Пещера расположена на расстоянии 40 км от пос. Порог, на правом берегу р. Уды, в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород мощностью более 100 м (Иркутская область, 2004). Протяженность пещерных ходов составляет 1120 м при амплитуде 28 м. Вход приурочен к нижней части утеса, обрамленного осыпью (рис. 1).

Пещера заложена в породах тагульской свиты верхнего рифея. Толща представлена переслаиванием доломитов, алевролитистых доломитов, песчаников и алевролитов. Полость развивалась, вероятно, по трещине бортового отпора и тектоническим трещинам, в местах пересечения которых сформировались обвалы залы. Сечения ходов по большей части остроугольные, для наиболее промытых участков наблюдаются сложные очертания: в верхней части ход щелевидный, ниже расширяется, затем резко сужается и вновь расширяется (рис. 2, а). Такая морфология вызвана неравномерным составом вмещающих пород, которые включают в себя как карбонатные, так и менее растворимые терригенные отложения. В формировании состава ледяных образований в пещерах принимают участие инфильтрационные воды гидрокарбонатно-кальциевого и гидрокарбонатно-магниево-кальциевого состава.

По сообщению А.Г. Докучаева, температура в разных точках пещеры изменяется от 3 до 4 °С. Неравномерность микроклимата обусловлена сильным током воздуха вследствие близости пещеры к поверхности и большого влияния на подземный микроклимат атмосферных температурных условий.

Водотоки отсутствуют, но на отдельных участках пещеры отмечается капез конденсационного и инфильтрационного генезиса. В привходовой части, а также на участках, сообщающихся с поверхностью по системе трещин, в зимний период фор-



**Рис. 2.** Пример характерного сечения наиболее промытого хода пещеры (а) и ледяные образования конжеляционного генезиса (сталагмиты) (б). На полу и выступах стен отмечается слой рыхлых отложений смешанного остаточного и водно-механического происхождения. На поверхности и у основания ледяных сталагмитов виден белый налет криогенных минеральных образований (б). Автор фотографий С.Ю. Пономарев.

**Fig. 2.** An example of a typical cross-section of the most washed passage of a cave (a); ice formations of congelation genesis (stalagmites) (b). There are a layer of loose sediments of mixed residual and water-mechanical origin on the floor and on the ledges of the walls. On the surface and at the base of the ice stalagmites, a white coating of cryogenic mineral formations is visible (b). Photo by S.Yu. Ponomarev.

мируются ледяные образования конжеляционного генезиса: сталагмиты и ледяные коры на стенах и на полу (рис. 2, б), а также кристаллы атмосферного льда.

Отбор образцов проводился в ходе исследовательских выездов в январе 2017 г. (руководитель А.Г. Докучаев) и 2019 г. (руководитель Э.А. Силушкина). Были взяты образцы вмещающих пород и вторичных образований, упавшие или сломавшиеся естественным путем.

Определение минерального состава образцов проводилось в ЦКП Института земной коры СО РАН в г. Иркутске М.Н. Рубцовой. Пробы, истертые в агатовой ступке со спиртом, были исследованы методом порошковой дифракции на рентгеновском дифрактометре ДРОН – 3.0. Условия съемки: излучение –  $\text{CuK}\alpha$ , Ni – фильтр,  $V = 25$  кВ,  $I = 20$  мА, шаг сканирования –  $0.05^\circ$ , угловой диапазон:  $5^\circ - 60^\circ$ . Фазовый состав проб расшифрован с помощью программы EVA (Diffra<sup>plus</sup>, PDF–2, 2007 г.).

Исследование морфологии и химического состава вторичных минеральных образований проводилось на сканирующем электронном микроскопе VEGA 3 LMN с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350/X-max 20 в Горном институте УрО РАН в г. Пермь. Образцы после высушивания при комнатной температуре напылялись углеродом и исследовались в камере с высоким вакуумом.

Изотопные анализы углерода и кислорода выполнялись в Innsbruck Quaternary Group при Инсбрукском университете (руководитель – академик Австрийской академии наук, профессор К. Шпетль) на масс-спектрометре Delta V (Thermo Fisher Scientific), оснащенный автоматической линией для анализа карбонатов на основе интерфейса GASBENCH (Thermo Fisher Scientific) по методике изложенной в работе (Spotl, Vennemann, 2003). По 7 образцам было сделано 67 анализов, после чего для каждого образца были выбраны репрезентативные анализы. Результаты приведены в шкале VPDB, реализуемой посредством двух стандартных образцов NBS 19 и LSVEC (аналитическая погрешность на уровне  $1\sigma$  составляет 0.1 ‰ для изотопов С и О).

## МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ОТЛОЖЕНИЙ

В пещере наблюдается пять генетических типов (Максимович, 1963) отложений: обвальные, водные механические, остаточные, водные хемогенные, а также криогенные образования.

Обвальные образования представлены двумя разновидностями (Дублянский, 2000): термогравитационной и обвально-гравитационной. Обе разновидности сложены обломками вмещающих пород, обрушившихся со сводов пещер. При этом термогравитационные отложения, сформированные за счет колебаний суточных температур, обильны в привходовой части, которая подвергается сильному выветриванию вследствие колебания температуры на поверхности. Обвально-гравитационные отложения распространены на всем протяжении пещеры и особенно характерны для обвальных залов.

Водные механические осадки, сформированные древними водотоками, представлены толщей тонкозернистых рыхлых отложений, наибольшая мощность которых наблюдается в привходовой части (рис. 2, а).

Остаточные образования, состоящие из нерастворимого остатка вмещающих пород, находятся в пещере совместно с водными механическими и обвальными отложениями.

Водные хемогенные образования представлены агрегатами гравитационных и кораллитовых кор в соответствии с классификацией, основанной на способе подачи питающего раствора (Степанов, 1971; Мальцев, 1993) и образуют мелкие сталактиты, маломощные коры на стенах и кораллиты (рис. 3, а, б). Сталактиты сложены кальцитом. В составе кор и кораллитов был отмечен арагонит (табл. 1, рис. 4).

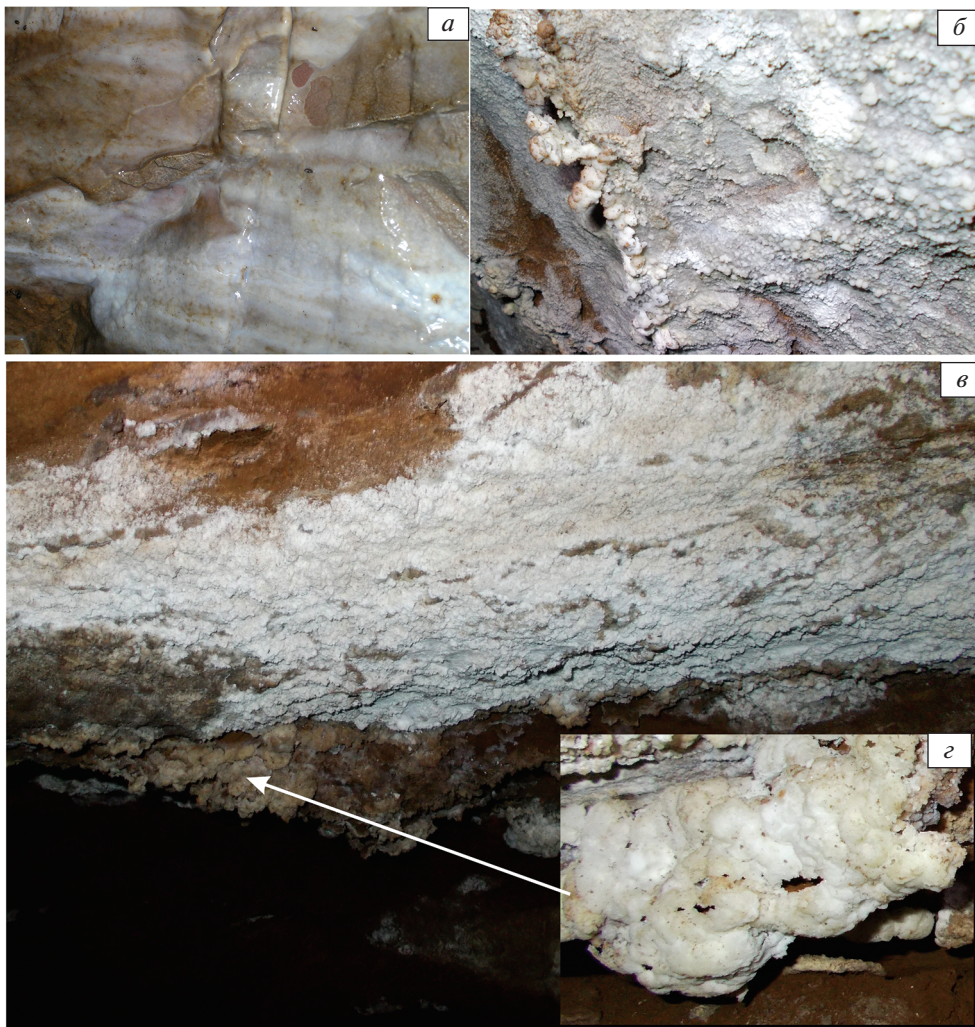
Кроме того, в пещере наблюдаются образования неясного генезиса: рыхлые осыпающиеся настенные коры, пещерная “пудра” (рис. 3, в, г) и скопление мелких агрегатов – пещерного “жемчуга” (табл. 1).

Пещерная “пудра” широко распространена в п. Гребневской на поверхности стен в их нижней части (около 0.5 м от пола). Обычно “пудра” влажная и пластичная, но на отдельных, хорошо вентилируемых, участках пещеры встречается в виде сухих осыпающихся скоплений. “Пудра” сложена гидромагнезитом  $Mg_5(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 4H_2O$ , представленным агрегатами листоватых кристаллов размером до 20 микрон (рис. 5, а; рис. 6).

Совместно с “пудрой”, ниже участков ее развития, были встречены тонкие легко отстающие от стены коровидные агрегаты, зачастую образующие спелеотемы, получившие в зарубежной литературе (Hill, Forti, 1997) название пещерных “пузырей” размером до первых сантиметров (рис. 3, г). Данные спелеотемы сложены гидромагнезитом, так же, как и “пудра” (рис. 7).

В пещере также были встречены минеральные агрегаты, подобные очень мелкому пещерному “жемчугу” – округлые конкреции размером до 1 мм, состоящие из ромбоэдрических кристаллов кальцита (рис. 5, б, в) длиной до 50 микрон. Скопления, насчитывающие десятки “жемчужин”, наблюдались в миниатюрных (до 10 см) гуровых ванночках. В минеральном отношении “жемчужины” сложены магниезальным кальцитом (содержание MgO достигает 10.3 мас. %) (рис. 8).

Криогенные образования, которые являются отдельным типом минеральных образований пещер, формируются вследствие кристаллизации растворенных компонентов из вод, циркулирующих в пещере. Минералообразование происходит при повышении концентрации растворов в процессе замерзания. В п. Гребневской криоминералы находятся в привходовой части пещеры в месте распространения сезонных ледяных образований и представляют собой мучнистую массу белого цвета, покрывающую сталактиты и в отдельных случаях образующую скопления мощностью до 0.5 см возле их основания (табл. 1, рис. 2, б). По данным рентгенофазового анализа,



**Рис. 3.** Минеральные образования п. Гребневской: *a* – кальцитовые коры, *б* – коры и кораллиты арагонит-кальцитового состава, *в* – слой гидромагнетитовой пещерной “пудры” на стене пещеры и гидромагнетитовые покровы (*з*), стрелкой показано положение покровов относительно скопления пещерной “пудры”.

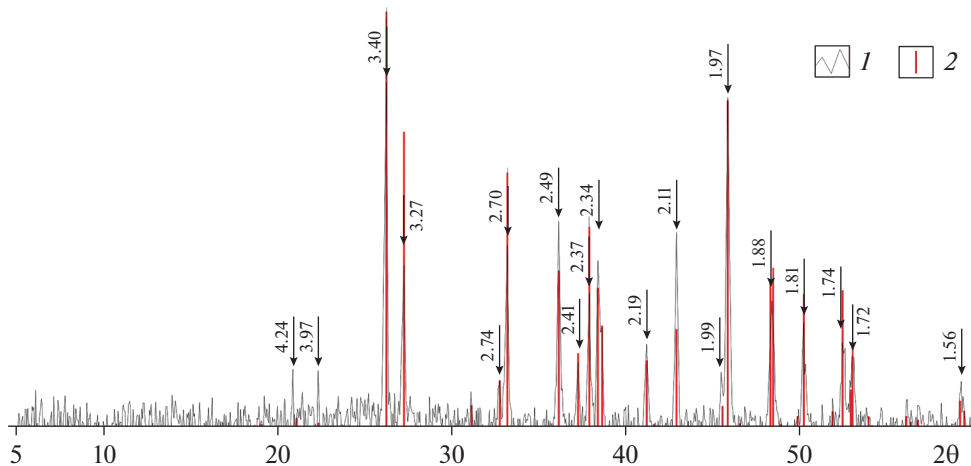
**Fig. 3.** Mineral formations of the Grebnevskaya cave: *a* – calcite flowstone, *б* – flowstone and corallites of aragonite-calcite composition, *в* – a layer of hydromagnesite cave “powder” on the cave wall and hydromagnesite covers (*з*), the arrow shows the position of the covers relative to the accumulation of cave “powder”.

криогенные образования сложены лансфордитом и кальцитом; также в них была отмечена аллотигенная примесь кварца (рис. 9).

Лансфордит  $MgCO_3 \cdot 5H_2O$  представлен хорошо образованными кристаллами размером до 400 микрон (рис. 10, *a*, *б*), кальцит формирует обрастания вокруг кристаллов лансфордита (рис. 10, *в*). На кальците зачастую наблюдается пленка гидроксидов железа и марганца (рис. 10, *з*), которая придает частицам коричневый цвет.

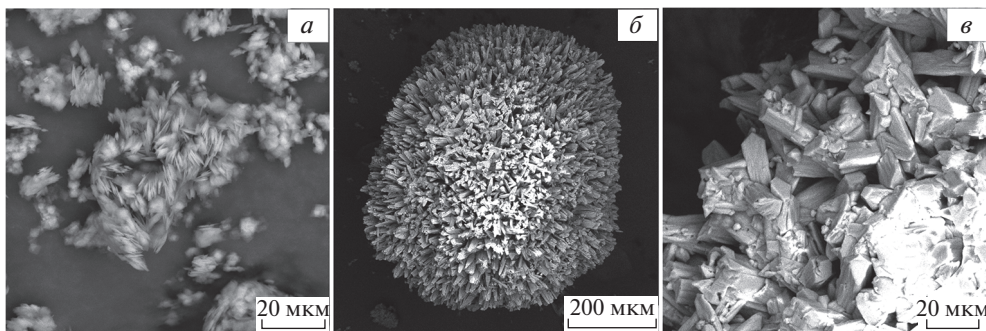
Таблица 1. Характеристика минеральных агрегатов п. Гребневская  
Table 1. Mineral aggregates of the the Grebnevskaya cave

Название	Условия нахождения в пещере	Морфология	Минеральный состав	Изотопный состав С и О		Предполагаемый механизм образования
				$\delta^{13}\text{C}, \text{‰ VPDB}$	$\delta^{18}\text{O}, \text{‰ VPDB}$	
Коры	Покрывают отдельные участки стен	Прочные коры от белого до коричневого цвета, толщиной до 1 см	Кальцит $\text{CaCO}_3$	Не определялся	Не определялся	Отложение из раствора, стекающего по стенам
Сталактиты	Свисают с потолка и выступов стен	Конические агрегаты длиной до 3 см	Кальцит $\text{CaCO}_3$	Не определялся	Не определялся	Отложение из капелек, формирующихся на выступах потолка и стен при медленном стекании раствора
Кораллиты	Покрывают отдельные участки стен	Почковидные агрегаты размером до 1 см	Кальцит, арагонит $\text{CaCO}_3$	Не определялся	Не определялся	Формирование из тонких пленок раствора, движущихся под влиянием капиллярных сил
Пещерные "пузыри"	Покрывают отдельные участки стен	Хрупкие белесые пузырчатые коры толщиной до 2 мм	Гидромагнезит $\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Не определялся	Не определялся	Перекристаллизация и цементация пещерной "пудры" в периоды ее увлажнения и высыхания
Пещерный "жемчуг"	Находится в углублениях кальцитовых коры на стене	Конкреции до 1 мм в диаметре	Кальцит $\text{CaCO}_3$	+4.0	-7.2	Собираетелная перекристаллизация криогенного материала при замораживании и оттаивании наледи
Пещерная "пудра"	Покрывает поверхность стен в их нижней части	Белые сухие или влажные муцистые отложения мощностью до 2 мм	Гидромагнезит $\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	+6.3	-1.1	Отложение в ходе быстрого испарения тонкой пленки раствора на стенах наиболее хорошо вентилируемых участков пещеры
Криогенная мука	Покрывает поверхность ледяных сталагмитов	Белые муцистые отложения мощностью до 0.5 см	Лансфордит $\text{MgCO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , кальцит $\text{CaCO}_3$	от +18.4 до +18.8	от -4.6 до -6.7	Минеральные частицы образуются при кристаллизации растворенных компонентов в ходе быстрого замерзания капелек на замороженный пол воды и затем освобождаются из льда при его испарении



**Рис. 4.** Дифрактограмма кораллита, сложенного арагонитом. 1 – исходные данные (здесь и в дифрактограммах ниже), 2 – эталон сравнения 01-073-3251 (A) арагонит  $\text{CaCO}_3$ . Цифрами над пиками обозначены межплоскостные расстояния (Å) (здесь и в дифрактограммах ниже).

**Fig. 4.** Diffractogram of corallite composed of aragonite. 1 – original data (here and for diffractograms below), 2 – comparison standart 01-073-3251 (A) aragonite  $\text{CaCO}_3$ . The numbers above peaks indicate the interplanar distances (Å) (here and for diffractograms below).



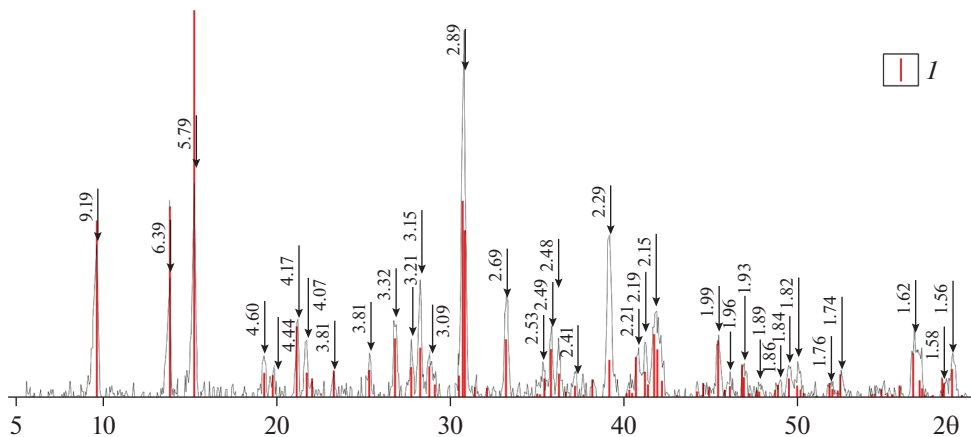
**Рис. 5.** Морфология кристаллов и агрегатов пещерной “пудры” (а); общий вид “жемчуга” (б); поверхность “жемчужин”, состоящая из ромбоэдрических кристаллов кальцита (в). Фотографии в обратно-отраженных электронах.

**Fig. 5.** Morphology of crystals and aggregates of cave “powder” (a); general view of “pearls” (b); “pearls” surface, consisting of rhombohedral calcite crystals (v). BSE images.

## ИЗОТОПИЯ КИСЛОРОДА И УГЛЕРОДА

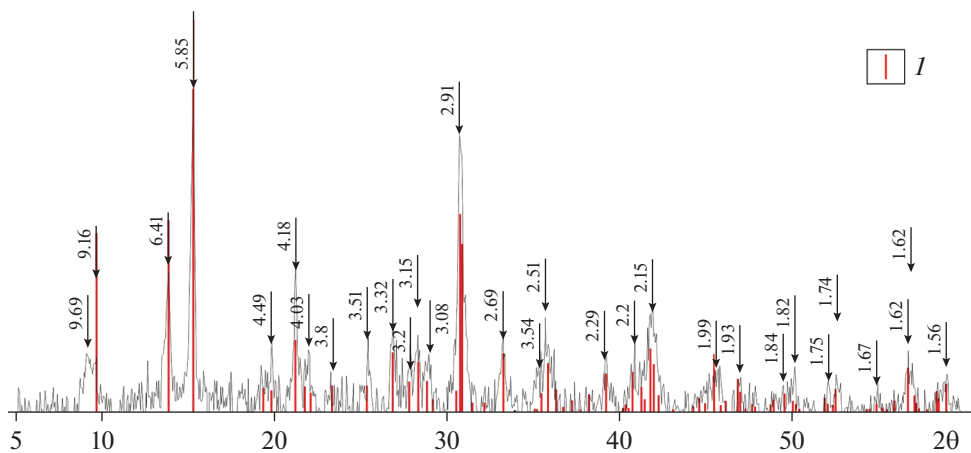
Изотопный состав С и О “жемчужин”, криогенной муки, пещерной пудры и вмещающих пород представлен на рис. 11.

Изотопный состав вмещающих пород варьирует  $\delta^{18}\text{O}$  от  $-11.5$  до  $-12.6$  ‰ VPDB и  $\delta^{13}\text{C}$  от  $-3.6$  до  $+1.1$  ‰ VPDB. Эти значения, в целом, соответствуют составу типичных морских осадочных карбонатов.



**Рис. 6.** Диффрактограмма пещерной “пудры”, сложенной гидромагнетитом. *I* – эталон сравнения 01-070-1177 (N) гидромагнетит  $Mg_5(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 4H_2O$ .

**Fig. 6.** Diffraction pattern of cave “powder” composed of hydromagnesite. *I* – comparison standard 01-070-1177 (N) hydromagnesite  $Mg_5(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 4H_2O$ .

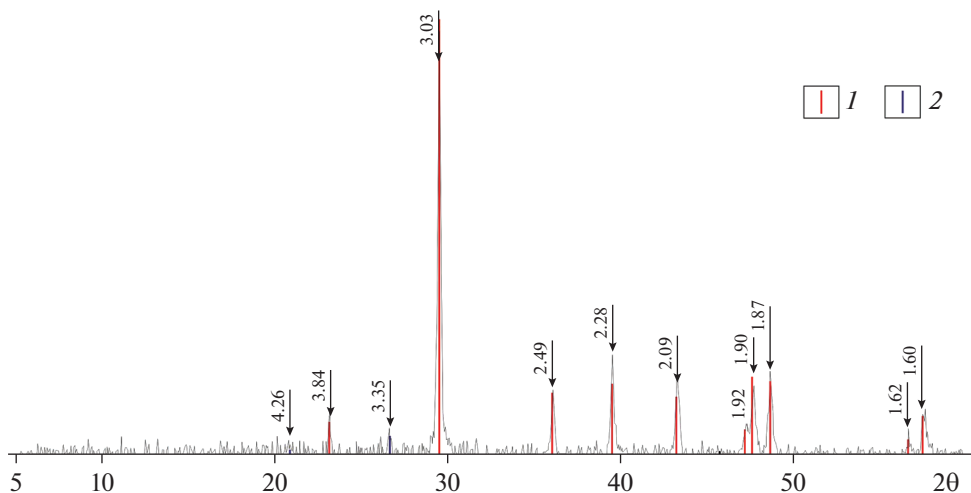


**Рис. 7.** Диффрактограмма пещерного “пузыря”, сложенного гидромагнетитом. *I* – эталон сравнения 01-070-1177 (N) гидромагнетит  $Mg_5(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 4H_2O$ .

**Fig. 7.** Diffraction pattern of cave “bubble” composed of hydromagnesite. *I* – comparison standard 01-070-1177 (N) hydromagnesite  $Mg_5(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 4H_2O$ .

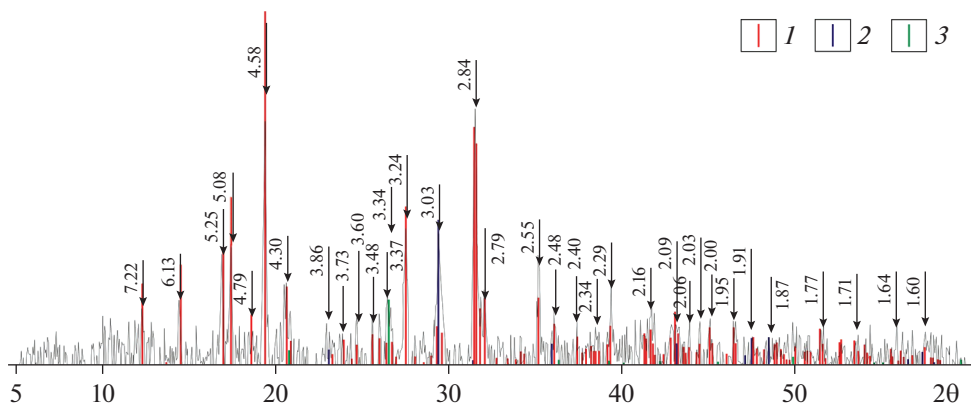
“Жемчужины”, отобранные в гуровых ванночках на стене пещеры, имеют значения  $\delta^{18}O - 7.2\text{‰ VPDB}$  и  $\delta^{13}C + 4.0\text{‰ VPDB}$ , их образование нами связывается с периодическим замораживанием и размораживанием питающих растворов и собирательной перекристаллизацией криогенного материала, подобно механизму, описанному для пещеры Победа (Киндерлинская), расположенной в республике Башкортостан (Кадебская, Чайковский, 2014).





**Рис. 8.** Диффрактограмма пещерного “жемчуга”, сложенного кальцитом (также отмечались следы кварца). 1–2 – эталоны сравнения: 1 – 01-072-4582 (A) кальцит  $\text{CaCO}_3$ , 2 – 01-089-8935 (A) кварц  $\text{SiO}_2$ .

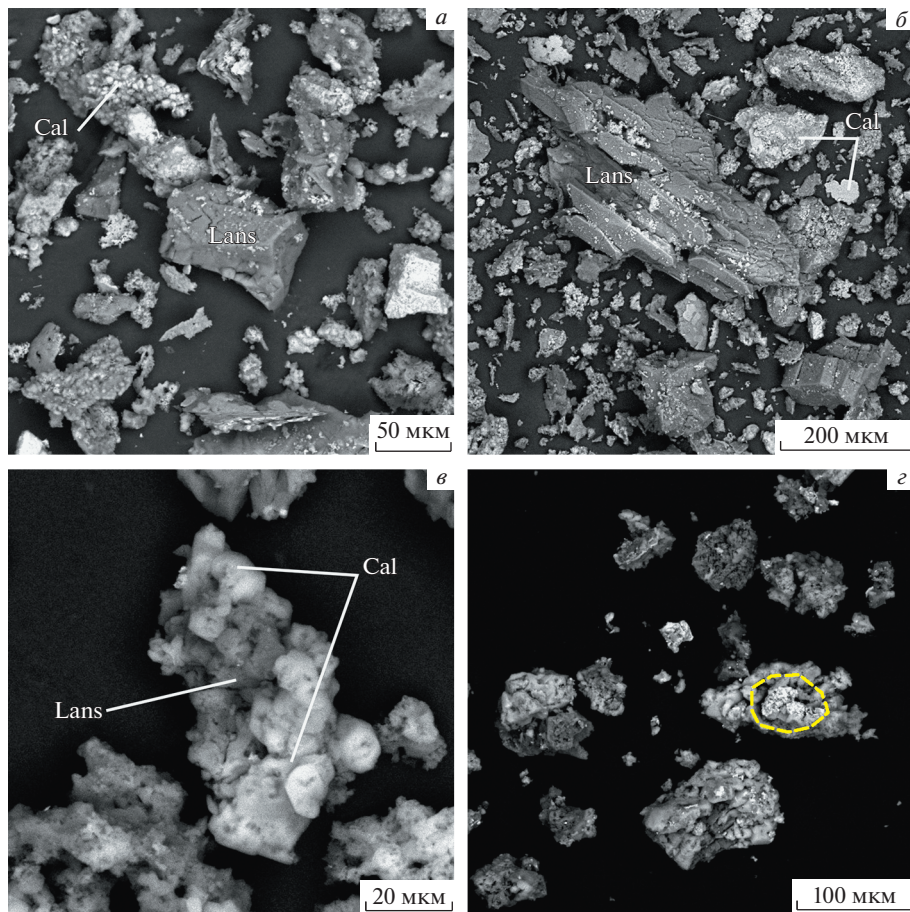
**Fig. 8.** Diffractogram of cave “pearl” composed calcite (also traces of quartz were noted). 1–2 – comparison standards: 1 – 01-072-4582 (A) calcite  $\text{CaCO}_3$ , 2 – 01-089-8935 (A) silicon oxide  $\text{SiO}_2$ .



**Рис. 9.** Диффрактограмма криогенных образований, сложенных лансфордитом и кальцитом с небольшой примесью кварца. 1–3 – эталоны сравнения: 1 – 01-080-1641 (N) лансфордит  $\text{MgCO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , 2 – 01-086-2334 (A) кальцит  $\text{CaCO}_3$ , 3 – 01-089-8937 (A) кварц  $\text{SiO}_2$ .

**Fig. 9.** Diffractogram of cryogenic formations composed of lansfordite and calcite with small amount of quartz. 1–3 – comparison standards: 1 – 01-080-1641 (N) lansfordite  $\text{MgCO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , 2 – 01-086-2334 (A) calcite  $\text{CaCO}_3$ , 3 – 01-089-8937 (A) silicon oxide  $\text{SiO}_2$ .

Изотопный состав криогенной муки из пещеры составил  $\delta^{18}\text{O}$  от  $-4.6$  до  $-6.7$  ‰ VPDB и  $\delta^{13}\text{C}$  от  $+18.4$  до  $+18.8$  ‰ VPDB, что соответствует изотопному составу кальцита, который образуется в условиях быстрой (шоковой) кристаллизации. При образовании таких кристаллов главным является кинетический эффект, связанный с

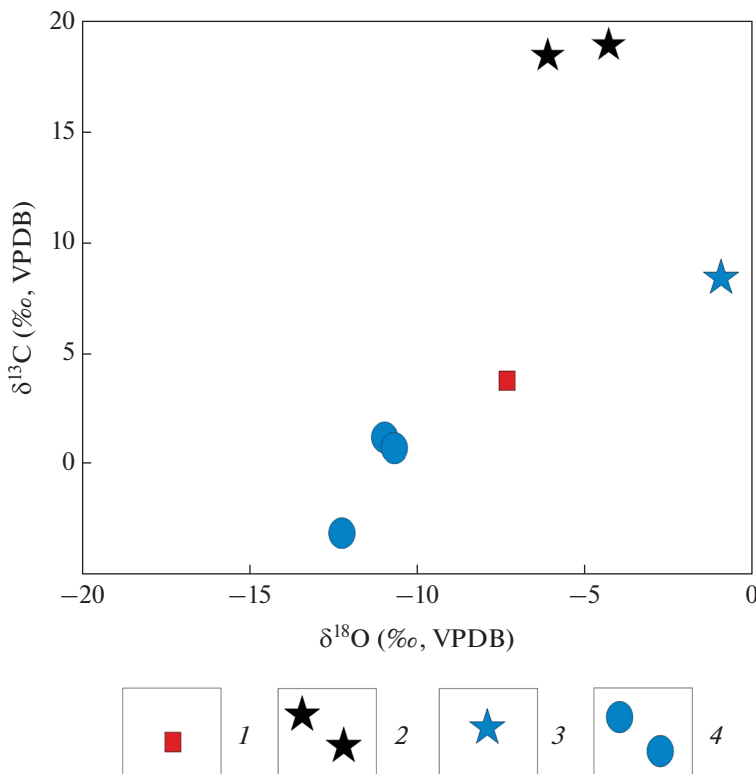


**Рис. 10.** Морфология криогенных образований: *a, б* – кристаллы лансфордита (Lans) в окружении кальцитовых агрегатов (Cal); *в* – сросток лансфордита и кальцита; *з* – сростки лансфордита и кальцита с пленками гидроксидов железа и марганца на поверхности (обведено пунктиром). Фотографии в обратно-отраженных электронах.

**Fig. 10.** Morphology of cryogenic formations: *a, б* – crystals of lansfordite (Lans) surrounded by calcite aggregates (Cal); *в* – aggregate of lansfordite and calcite; *з* – aggregate of lansfordite and calcite with films of iron and manganese hydroxides on the surface (circled by a dotted line). BSE images.

быстрым удалением  $\text{CO}_2$  и неравновесным испарением воды (Killawee et al., 1998), что отражается в росте содержания  $^{13}\text{C}$  при почти постоянном значении  $\delta^{18}\text{O}$ . Замораживание происходит настолько быстро, что фракционирование изотопов кислорода между водой и льдом не происходит, а подвижный изотоп  $^{12}\text{C}$  переходит в углекислый газ (Zak et al., 2018).

Изотопный состав пещерной “пудры”, состоящей из гидромагнезита, равен  $\delta^{18}\text{O} -1.1\text{‰ VPDB}$  и  $\delta^{13}\text{C} +6.3\text{‰ VPDB}$ . Значение  $\delta^{18}\text{O}$  соответствует  $\delta^{18}\text{O VSMOW}$  и составляет 29.7‰. Такой состав характерен для месторождений с высоким содержанием гидромагнезита в современных эвапоритовых озерах (Zachmann, 1986; Braithwaite,



**Рис. 11.** Изотопный состав “жемчужин” (1), криогенной муки (2), пещерной “пудры” (3) и вмещающих пород (4) из пещеры Гребневская.

**Fig. 11.** Isotopic composition of “pearls” (1), cryogenic flour (2), cave “powder” (3) and host rock (4) from the Grebnevskaya cave.

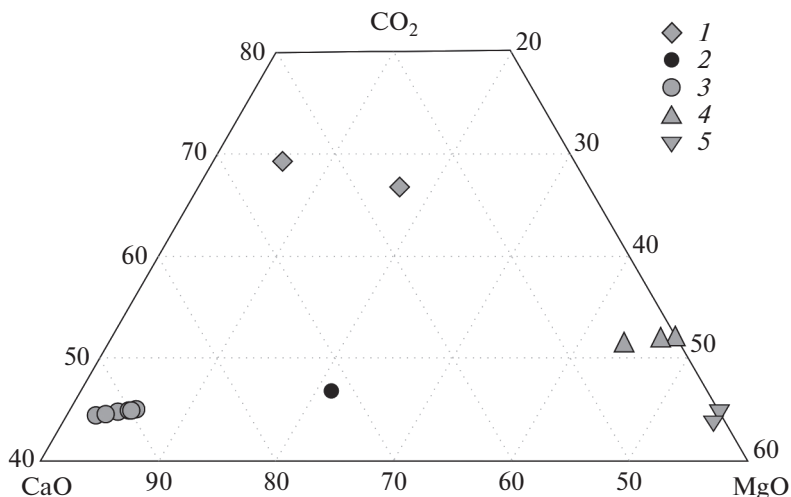
Zedef, 1996) и ясно указывают на то, гидромагnezит из воды осаждается при быстром испарении (Wilson et al., 2010).

Согласно теоретическим расчетам (O’Neil, Barnes, 1971), атмосферный CO<sub>2</sub> имеет δ<sup>13</sup>C от 9 до 7 ‰. Гидромагnezит, который осаждается в равновесии с атмосферным CO<sub>2</sub> (с δ<sup>13</sup>C от 7 до 9 ‰), характеризуется δ<sup>13</sup>C от 1.2 до 7.6 VPDB (Clark, Fritz, 1997). Эта тенденция к обогащению <sup>13</sup>C согласуется либо с очень медленной диффузией атмосферного CO<sub>2</sub> в раствор, либо дегазацией легкого CO<sub>2</sub> из раствора.

В целом отмечается обогащение δ<sup>13</sup>C и δ<sup>18</sup>O вторичных образований от кальцитовых “жемчужин” к пещерной пудре и криогенным образованиям.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Была построена диаграмма расчета молекулярного соотношения CaO, MgO и CO<sub>2</sub> во вмещающих породах, льдах и минеральных образованиях п. Гребневская (рис. 12). На диаграмме можно видеть, что при некоторых различиях содержаний CaO и MgO в составе вмещающих пород составы льда имеют весьма близкие содержания CaO и MgO и из растворов отлагаются сходные минералы. При сравнении друг с другом эле-



**Рис. 12.** Соотношение оксидов CaO, MgO и CO<sub>2</sub> в химическом составе вмещающих карбонатных пород, ледяных образований и отложений в пещере Гребневская: 1 – наледеобразующие воды, 2 – вмещающие породы, 3 – пещерный “жемчуг”; 4 – лансфордит (криогенные образования), 5 – гидромагнетит (пещерная “пудра”).

**Fig. 12.** Ratio of oxides CaO, MgO and CO<sub>2</sub> in the host carbonate rocks, ice formations and sediments in the Grebnevskaya cave: 1 – ice-forming waters, 2 – host rocks, 3 – calcite aggregates, 4 – lansfordite (cryogenic formations), 5 – hydromagnesite (cave “powder”).

ментного состава минеральных образований п. Гребневская наблюдается увеличение содержания магния от кальцитовых образований (“жемчужин”) к криогенным образованиям и пещерной “пудре”.

Обычно пещерный “жемчуг” формируется в мелких подземных водоемах со слабым движением воды (за счет падающих в водоем капель или впадающего ручья); при этом, чем быстрее циркуляция воды, тем более гладкой становится поверхность сферолитов вследствие их вращения и обтачивания (Hill, Forti, 1997). Строение “жемчужин” из п. Гребневская указывает на их формирование в условиях минимального движения воды. Учитывая морфологию, пространственное положение и минеральный состав “жемчужин”, можно предположить, что данные образования были сформированы при падении капель в наполненные водой углубления в кальцитовой коре (так называемые гуровые ванночки). При этом их изотопный состав сходен с составом мелкозернистых криогенных образований из п. Скеришоара (Zak et al., 2008). Это допускает режелационный механизм формирования данных образований – то есть связанный с размораживанием и собирательной перекристаллизацией оттаявшего криогенного материала.

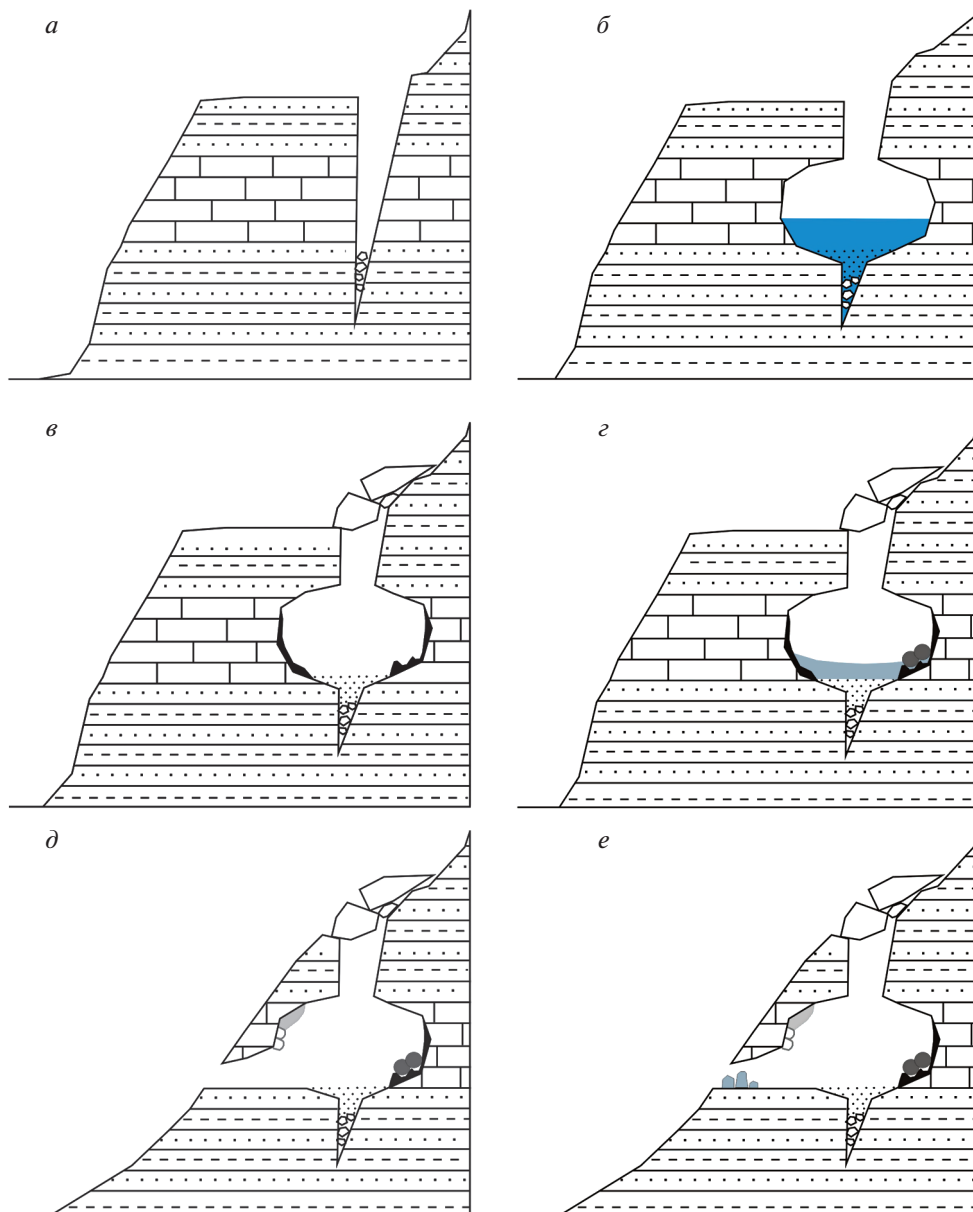
Нахождение коровидных агрегатов и пещерных “пузырей” совместно с “пудрой” объясняется, по-видимому, перекристаллизацией и цементацией мелкокристаллических образований при сезонном увлажнении. На это косвенно указывает и приуроченность кор и пещерных “пузырей” к нижним границам скоплений “пудры”.

Гидромагнетит часто встречается в пещерах и является распространенным минералом мелкозернистых образований (пещерная “пудра”, “лунное молоко”) (Hill,

Forti, 1997). Его образование в основном связано с растворами, обогащенными Mg. Также высказаны предположения (Canaveras et al., 1999; Power et al., 2009) о его органическом генезисе. Рост гетеротрофных бактерий, использующих органический углерод из растворенных органических веществ вызывает повышение щелочности в их микросреде (растворах) и благоприятствует образованию гидромагнезита. Образование монокристаллических игольчатых образований связывалось всегда с присутствием органического вещества (Verrecchia, Verrecchia, 1994). Отличие морфологии и изотопного состава гидромагнезита пещерных “пузырей” и “пудры” из п. Гребневская позволяет нам отнести его к абиогенным образованиям.

В п. Гребневская вода попадает исключительно за счет прямой инфильтрации. Гидромагнезитовые спелеотемы являются агрегатами современного этапа минералообразования в пещере и образуются при быстром испарении в практически безводных условиях. К современному этапу минералообразования относится также и формирование криогенных минеральных образований, в составе которых преобладает лансфордит. По составу криогенные образования рассматриваемой пещеры сходны с криогенными образованиями пещер Хрустальная и Онотская (Базарова и др., 2016). Лансфордитовый состав криогенных образований в п. Гребневской обусловлен высоким содержанием ионов магния в наледообразующих растворах за счет выщелачивания вмещающих доломитов. Специфической чертой криогенного материала из п. Гребневская является примесь оксидов железа и марганца, наличие которой связано с повышенным содержанием данных элементов во вмещающих породах. Следует отметить, что в целом такие примеси не характерны для криогенных образований.

По результатам изучения отложений п. Гребневская была построена схема предполагаемых этапов эволюции подземной полости и условий формирования минеральных агрегатов в ней (рис. 13). Расположение пещеры в береговом утесе, ориентировка основного хода параллельно руслу реки, остроугольные и местами шелевидные сечения ходов с глыбовыми завалами на полу и сужениями в верхней части дают основания полагать, что полость сформировалась по трещине бортового отпора (рис. 13, а). Впоследствии исходная полость была расширена при размывании пласта наиболее растворимых карбонатных пород, зажатою между пластами песчаников и алевролитов, и частично заполнена тонкозернистыми рыхлыми водными механическими осадками (рис. 13, б). После того, как исходная полость была перекрыта обвалившимися со склона блоками вмещающих пород, скорость и объем водопритока снизились. При стекании раствора по стенам пещеры сформировались мелкие сталактиты и кальцитовые коры, в том числе ступенчатые коры с углублениями – так называемые гуровые ванночки (рис. 13, в), в которых был обнаружен пещерный “жемчуг”. Образование “жемчуга” мы связываем с изменением пещерного микроклимата, когда поступающая в пещеру вода замерзала поверх кальцитовых кор и внутри гуровых ванночек (рис. 13, г). При усилении врезания русла р. Уды произошло образование современного входа, что вызвало изменение циркуляции воздуха в подземной полости, вследствие чего наледь исчезла, а на стенах в наиболее сухих и продуваемых участках сформировались гидромагнезитовые отложения (пещерная пудра и “пузыри”) (рис. 13, д). Кроме того, в привходовой части пещеры в зимний период начали формироваться ледяные сталагмиты, на поверхности которых при испарении льда отлагались криогенные лансфордитовые образования (рис. 13, е).



Условные обозначения



**Рис. 13.** Схема предполагаемых этапов эволюции подземной полости и условий формирования минеральных агрегатов в ней: *a* – формирование исходной полости, *b* – расширение исходной полости и частичное заполнение ее рыхлыми осадками, *в* – уменьшение водопритока и образование кальцитовых кор, *г* – образование наледи в центральной части пещеры поверх кальцитовых кор и формирование режеляционного пещерного “жемчуга”, *д* – образование современного входа, изменение циркуляции воздуха в пещере и формирование гидромагнетитовых отложений, *е* – формирование современного облика пещеры и образование ледяных сталагмитов в привходовой части, на поверхности которых наблюдаются лансфордитовые отложения.

*1* – вмещающие породы (переслаивание доломитов, песчаников и алевролитов), *2* – водные механические осадки (*a*) и обвалы отложения (*b*), *3* – кальцитовые коры и пещерный “жемчуг” в углублениях кор, *4* – вода (*a*) и лед (*b*), *5* – пещерные “пузыри” (*a*) и скопления пещерной “пудры” (*b*).

**Fig. 13.** Scheme of proposed stages of the evolution of the cave and conditions of the formation of mineral aggregates inside it: *a* – the formation of the original cavity, *b* – expansion of the original cavity and its partial filling with loose sediments, *в* – decrease in the water inflow and the formation of calcite crusts, *г* – formation of the ice in the central part of the cave on top calcite crusts and the formation of the regelation cave “pearl”, *д* – the formation of a modern entrance, a change in air circulation in the cave and the formation of hydromagnesite deposits, *е* – the formation of the modern appearance of the cave and the formation of ice stalagmites in the entrance part, on the surface this stalagmites lansfordite deposits are observed.

*1* – host rocks (interbedding of dolomites, sandstones and siltstones), *2* – water mechanical sediments (*a*) and landslide deposits (*b*), *3* – calcite crusts and cave “pearl” in the depression of the crust, *4* – water (*a*) and ice (*b*), *5* – cave “bubbles” (*a*) and accumulation of cave “powder” (*b*).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенностью минерализации п. Гребневской является слабое развитие кальцитовых и арагонитовых образований и широкое распространение гидромагнетитовых образований в форме мелкокристаллических покровов (пещерная “пудра”), тонких кор и агрегатов (пещерные “пузыри”). В привходовой части пещеры распространены лансфордитовые образования.

Кальцит и арагонит слагают маломощные коры, небольшие сталактиты и кораллиты, которые были сформированы при слабом, но постоянном притоке раствора. Их наличие указывает на существование в пещере в прошлом условий частичной обводненности и, по-видимому, теплый климат.

Что касается кальцитового “жемчуга” режеляционного генезиса, то эти образования были сформированы после отложения кальцитовых кор, в условиях повторяющихся процессов замерзания и оттаивания раствора, при более холодном климате на поверхности.

Производными современных процессов минералообразования являются гидромагнетит и лансфордит. Лансфордит имеет криогенное происхождение и приурочен к зоне отрицательных температур. Гидромагнетитовые агрегаты формируются при быстром испарении раствора в практически безводных условиях в зоне положительных температур в пещере. Вероятно, гидромагнетит следует считать индикатором сухих хорошо вентилируемых условий в подземных полостях. Захороненные залежи этого материала могут указывать на существование таких условий в прошлом.

В работе задействовалось оборудование ЦКП “Геодинамика и геохронология” Института земной коры СО РАН в рамках гранта № 075-15-2021-682.

Изотопные исследования были выполнены при поддержке гранта РФФИ № 16-55-14002 “Миграция границы многолетней мерзлоты на границе Европа-Азия в плейстоцене” и гранта FWF № I027070 “Pleistocene permafrost boundary shifts at the Europe-Asia border”.

Авторы благодарят Э.А. Силушкину за помощь в отборе образцов, а также А.Г. Докучаева и С.Ю. Пономарева за предоставленные образцы и фотографии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Базарова Е.П., Кадебская О.И., Кононов А.М., Ущановская З.Ф. Условия и особенности криогенного минералообразования в пещерах южной части складчатого обрамления Сибирской платформы (Западное Прибайкалье и Восточный Саян) // Вестник Пермского университета. Геология. **2016**. Вып. 2 (31). С. 22–34.

Дублянский В.Н. Занимательная спелеология. Челябинск: Урал-ЛТД, **2000**. [http://rgo-speleo.ru/books/zanimatelnaya\\_speleologia.htm](http://rgo-speleo.ru/books/zanimatelnaya_speleologia.htm)

Иркутская область: экологические условия развития. Атлас. Москва – Иркутск, **2004**.

Кадебская О.И., Чайковский И.И. Минеральные образования пещеры Победа (Башкортостан), связанные с формированием и оттаиванием многолетнего льда // Известия РАН. Серия географическая. **2014**. № 3. С. 66–72.

Мальцев В.А. Минералы системы карстовых пещер Кап-Кутан (юго-восток Туркменистана) // Мир Камня. **1993**. № 2. [http://vl-maltsev.narod.ru/liter\\_ws\\_r.html](http://vl-maltsev.narod.ru/liter_ws_r.html)

Максимович Г.А. Основы карстования. Т. 1. Пермь, **1963**. 445 с.

Объяснительная записка к государственной геологической карте Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000. Серия Ангаро-Енисейская. Лист N-47 – Нижнеудинск. Санкт-Петербург: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, **2012**.

Осинцев А.В. Крупные пещеры Байкальского региона – новейшие исследования / Спелеология и спелестология – развитие и взаимодействие наук. Сборник материалов международной научно-практической конференции. Набережные Челны: НГПИ, **2010**. С. 99–101.

Степанов В.И. Периодичность процессов кристаллизации в карстовых пещерах / Труды минералогического музея им. Ферсмана. Вып. 20. Москва. **1971**. С. 161–171.

### Composition of Deposits in the Grebnevskaya Cave, Irkutsk Region

E. P. Bazarova<sup>a</sup>, \*, O. I. Kadebskaya<sup>b</sup>, O. V. Korotchenkova<sup>b</sup>, and M. N. Rubtsova<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Institute of the Earth Crust of Siberian Branch RAS, Irkutsk, Russia

<sup>b</sup>Mining Institute of Ural Branch RAS, Perm, Russia

\*e-mail: bazarova@crust.irk.ru

Mineral, chemical, and isotopic compositions of deposits in the Grebnevskaya cave have been studied. A feature of mineralogy of this deposits is limited abundance of calcite and aragonite as compared with hydromagnesite. Mineral aggregates formed in circumstances where a water flow is high enough (calcite crusts, cave “pearls”), are depleted in Mg and have low values of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  than sediments produced by capillary feeding (cave “powder”) and under cryogenesis. Three stages of the mineral formation were revealed, closely related to climatic conditions. At the stage of water enrichment, calcite stalactites and crusts, as well as aragonite aggregates, were occurred. When decrease in the water production and periodic decrease in temperature till negative values were take placed, “pearls” formed from regelation. Hydromagnesite and lansfordite deposits are related to modern mineral formation processes.

**Keywords:** cave, cryogenesis, lansfordite, hydromagnesite

### REFERENCES

Bazarova E.P., Kadebskaya O.I., Kononov A.M., Ushchapovskaya Z.F. Conditions and characteristics of cryogenic mineral formation in the caves of southern part of Siberian platform folding margins (Western Pre-Baikal region and Eastern Sayan). *Perm Univ. Bull.* **2016**. N 2 (31). P. 22–34 (in Russian).

Braithwaite C.J.R., Zedef V. Hydromagnesite stromatolites, sediments in an alkaline lake, Salda Golü, Turkey. *J. Sediment. Res.* **1996**. Vol. 66. N 5. P. 991–1002.

Canaveras J.C., Hoyos M., Sanchez-Moral S., Sanz-Rubio E., Bedoya J., Soler V., Groth I., Schumann P., Laiz L., Gonzales I., Sainz-Jimenez C. Microbial communities associated with hydromagnesite and needle-ber aragonite deposits in a karstic cave (Altamira, Northern Spain). *Geomicrobiol. J.* **1999**. Vol. 16. N 1. P. 9–25.

Clark I.D., Fritz P. Environmental isotopes in hydrology. CRC Press, **1997**. 328 p.



- Dublyansky V.N. Entertaining speleology. Chelyabinsk: Ural-LTD, **2000**. [http://rgo-speleo.ru/books/zanimatelnaya\\_speleologia.htm](http://rgo-speleo.ru/books/zanimatelnaya_speleologia.htm) (in Russian).
- Explanatory note to the state geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1000000. Angara-Enisey series. Sheet N-47 – Nizhneudinsk. Saint-Peterburg: VSEGEI, **2012**. (in Russian).
- Hill C.A., Forti P. Cave minerals of the world. Huntsville AL: National Speleological Society. **1997**. 463 p.
- Irkutsk Region: environmental conditions for development. Atlas. Moscow – Irkutsk, **2004**. (in Russian).
- Kadebskaya O.I., Chaikovskiy I.I. Mineral formations of the Pobeda cave (Bashkortostan) associated with the formation and thawing of multi-year ice. *Proc. Akad. Science USSR. Ser. Geol.* **2014**. N 3. P. 66–72 (in Russian).
- Killawee J.A., Fairchild I.J., Tison J.-L., Janssen L., Lorrain R. Segregation of solutes and gases in experimental freezing of dilute solutions: Implications for natural glacial systems. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **1998**. Vol. 62. N 23–24. P. 3637–3655.
- Maltsev V.A. Minerals of the Kap-Kutan karst caves system (south-east of Turkmenistan). *World of Stones.* **1993**. N 2. [http://vl-maltsev.narod.ru/liter\\_ws\\_r.html](http://vl-maltsev.narod.ru/liter_ws_r.html) (in Russian).
- Maksimovich G.A. Fundamentals of karst studies. Vol. 1. Perm, **1963**. 445 p. (in Russian).
- O'Neil J.R., Barnes I. C<sup>13</sup> and O<sup>18</sup> compositions in some fresh-water carbonates associated with ultramafic rocks and serpentinites: western United States. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **1971**. Vol. 35. N 7. P. 687–697.
- Osintsev A.V. Large caves of Baikal region – the newest explorations. In: *Speleology and speleology – the development and interaction of sciences. Proc. int. sci.conf.* Naberezhnye Chelny: NGPI, **2010**. P. 99–101 (in Russian).
- Power I.M., Wilson S.A., Thorn J.M., Dipple G.M., Gabites J.E., Southam G. The hydromagnesite playas of Atlin, British Columbia, Canada: a biogeochemical model for CO<sub>2</sub> sequestration. *Chem. Geol.* **2009**. Vol. 260. N 12. P. 286–300.
- Stepanov V.I. Frequency of crystallization processes in karst caves. *Proc. Fersman Miner. Museum RAS.* N 20. Moscow. P. 161–171 (in Russian).
- Spotl C., Vennemann T.W. Continuous-flow isotope ratio mass spectrometric analysis of carbonate minerals. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* **2003**. Vol. 17. P. 1004–1006.
- Verrecchia E.P., Verrecchia K.E. Needle-fiber calcite: a critical review and a proposed classification. *J. Sediment. Res.* **1994**. Vol. 64. N 3a. P. 650–664.
- Wilson S.A., Barker S.L., Dipple G.M., Atudorei V. Isotopic disequilibrium during uptake of atmospheric CO<sub>2</sub> into mine process waters: implications for CO<sub>2</sub> sequestration. *Environ. Sci. Technol.* **2010**. Vol. 44. N 24. P. 9522–9529.
- Zak K., Onac B.P., Kadebskaya O.I. et al. Cryogenic mineral formation in caves. In: *Ice Caves*. Ed. Persoiu A. and Lauritzen S.E. Pt. 6. Elsevier Inc., **2018**. P. 123–162.
- Zak K., Onac B.P., Persoiu A. Cryogenic carbonates in cave environments. *Rev. Quat. Intern.* **2008**. Vol. 187. P. 84–96.
- Zachmann D.W. Mg-carbonate deposits in freshwater environment. In: *Magnesite, Monograph Series on Mineral Deposits*. Ed. Moller P. **1989**. N 28. Berlin-Stuttgart: Borntraeger, P. 61–94.