

УДК 551.442

## Условия и особенности криогенного минералообразования в пещерах южной части складчатого обрамления Сибирской платформы (Западное Прибайкалье и Восточный Саян)

Е.П. Базарова<sup>а</sup>, О.И. Кадебская<sup>б</sup>, А.М. Кононов<sup>б</sup>, З.Ф. Ущাপовская<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Институт земной коры СО РАН, 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, 128

E-mail: bazarova@crust.irk.ru

<sup>б</sup>Горный институт УрО РАН, 614007, Пермь, ул. Сибирская, 78-а

E-mail: icecave@bk.ru

(Статья поступила в редакцию 24 марта 2016 г.)

Приведены новые сведения о криогенных образованиях пещер Прибайкалья и Восточного Саяна. Минеральный состав криогенных образований представлен лансфордитом и икаитом с примесью гипса и барита. Расчет молекулярного соотношения CaO, MgO и CO<sub>2</sub> во вмещающих карбонатных породах, наледях и криогенных минералах позволил показать, что кристаллизация икаита из раствора уменьшает преобладающее содержание CaO, создавая тем самым благоприятную обстановку для кристаллизации магниевых минералов. Выявлено, что при формировании криогенных выделений лансфордита в тонкой пленке водного раствора на поверхности льда или при смачивании минеральных зерен водой вследствие таяния льда возникают уплощенные кристаллы и агрегаты с плоским основанием. Минеральные зерна, освобожденные из наледи исключительно за счет испарения льда, не имеют каких-либо вторичных преобразований. Лансфордит впервые зафиксирован как криогенный минерал. Впервые в составе криогенных образований пещер Байкальского региона найден барит.

Ключевые слова: пещеры, криогенез, Прибайкалье, лансфордит, икаит

DOI: 10.17072/psu.geol.30.22

### Введение

На территории Западного Прибайкалья в силу климата региона и островного распространения многолетнемерзлых пород большинство пещер содержит сезонные, а в отдельных случаях – многолетние льды. Промерзание пещер и образование в них льда способствуют формированию нового типа пещерных отложений – криогенных минеральных образований, которые на сегодняшний день еще слабо изучены. Ранее на данной территории исследовались криоминеральные образования пещер Мечта, Таловская, Ая-Рядовая, Хо-

лодная и Охотничья. Были обнаружены мелкозернистые образования («мука») и крупнозернистые криогенные карбонаты [4, 5, 1, 2]. В минеральном отношении криогенный материал перечисленных пещер представлен кальцитом, доломитом, гипсом и деспюжолситом, из метастабильных минералов отмечается икаит (гексагидрат карбоната кальция).

В статье описываются условия нахождения, минеральный состав и форма кристаллов криогенных образований пещеры Хрустальной, расположенной на Приморском хребте западного побережья оз. Байкал, и пещеры Большая Онетская в пред-

горьях Восточного Саяна, что дает новые сведения о криоминералогии пещер южной части складчатого обрамления Сибирской платформ.

### Методика исследования

Методика исследования включала общую рекогносцировку и фотодокументацию ледяных образований пещер, проведенную в холодные и теплые периоды в течение пяти лет. Для наблюдения за динамикой колебаний поверхности многолетнего льда в п. Хрустальной были установлены реперы. Для определения химического состава льда были отобраны четыре пробы. Минеральная составляющая отбиралась с поверхности льда в разных частях пещер и транспортировалась в герметичных контейнерах, помещенных в термос со льдом, что позволило сохранить для исследования метастабильные минералы.

Минеральный состав криогенных образований был определен в Институте земной коры СО РАН в г. Иркутске методом термического анализа Н.В. Нартовой и рентгенофазового анализа З.Ф. Ущапковской. Содержания петрогенных элементов для вмещающих пород определялись химическим методом аналитиками М.М. Самойленко и Г.В. Бондаревой. Химический состав расплавов пещерного льда был изучен методами тетрометрии, гравиметрии и атомно-адсорбционной спектрометрии аналитиком Л.А. Дурбан. Исследование морфологии и химического состава криогенных 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. Перми аналитиком О.В. Коротченковой.

### Общие сведения о пещерах

Пещера Хрустальная расположена на юго-восточном залесенном склоне Приморского хребта и в геологическом отно-

шении заложена в породах улунтуйской свиты верхнего протерозоя, представленной онколитовыми и строматолитовыми битуминозными известняками и доломитами. Химический состав вмещающих пород приводится в табл. 1.

Пещера начинается воронкой-провалом глубиной 13 м и представляет собой систему из шести этажей-меандров, вытянутых с юго-запада на северо-восток, разделенных висячими завалами. Так как план пещеры неинформативен вследствие наложения этажей друг на друга, на схеме приводится только разрез (рис. 1).

Длина пещеры составляет 170 м при амплитуде 37 м. Ширина галереи нижнего этажа от 1,5 до 4 м при высоте потолка 15 м, ширина меандров верхних ярусов 0,3–2,5 м при высоте потолка 0,5–3 м. По всей видимости, пещера является реликтом более крупной полости, разрушенной при эрозии склона, на что указывают вскрытые в северо-восточной стене входной воронки каналы верхних этажей.

Натечные образования в Хрустальной угнетены, что характерно для замороженных пещер. Встречаются небольшие (высотой до 3 см) кальцитовые кораллиты с моногидрокальцитовыми обрастаниями и маломощные (толщиной до 1 см) коры, местами сколотые вследствие десквамации при замерзании воды.

Большая Онотская пещера (одна из двух Онотских пещер) расположена на правом берегу р. Онот в предгорьях Восточного Саяна и приурочена к доломитам камчадальской свиты нижнего протерозоя. Пещера имеет два входа (основной, аркообразный, и верхний – трубообразный провал) и представляет собой практически прямой ход шириной от 4 до 10 м, приводящий в большой грот длиной 20 м при ширине до 16 м (рис. 2) Длина пещеры 226 м при амплитуде 60 м.

В пещере широко развиты древние натечные образования, представленные мощной (свыше 20 см) кальцитовой корой площадью в несколько квадратных метров. Естественная тяга воздуха между верхним и нижним входами не способст-

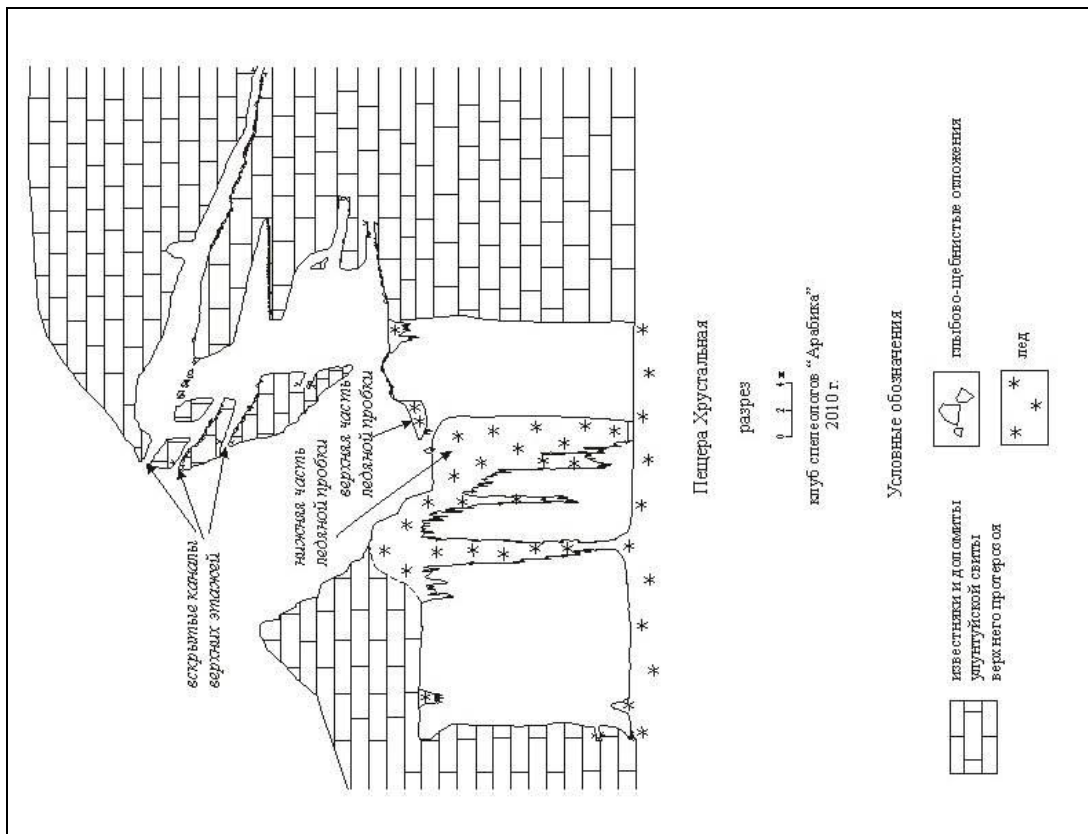


Рис. 1. Схема пещеры Хрустальная (разрез)

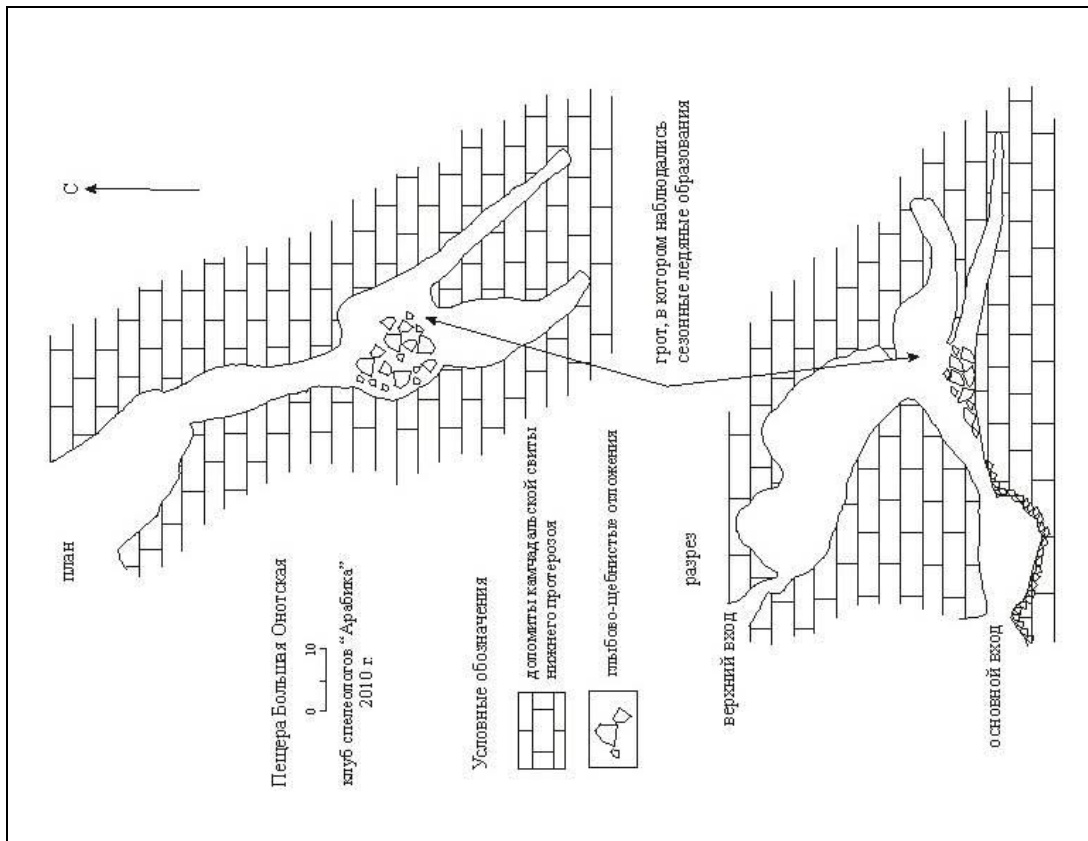


Рис. 2. Схема Большой Онотской пещеры (план и разрез)

Таблица 1. Химический состав вмещающих пород пещер Охотничья, Хрустальная и Большая Онетская (мас. %)

Компоненты	№ образца													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
SiO <sub>2</sub>	1.99	2.0	1.36	0.57	0.71	0.57	0.58	6.84	8.04	5.3	4.1	3.03	14.78	11.9
TiO <sub>2</sub>	<нпо	0.05	0.03	0.02	<0.02	0.04	<нпо	0.08	0.11	0.07	0.07	0.02	0.04	0.04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.96	0.9	0.51	0.39	0.3	0.64	0.64	2.36	3.04	1.95	1.92	0.64	4.17	0.64
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.3	0.26	<0.2	0.36	0.32	0.33	0.28	1.05	1.09	0.72	0.98	1.09	2.0	1.03
FeO	0.32	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	0.13	0.16	0.44	0.41	0.3	0.4	0.64	1.1	0.71
MnO	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.01	<нпо	0.02	0.02	0.02	0.02	0.35	0.35	0.71
MgO	8.9	1.43	6.09	0.46	0.46	11.34	17.79	9.82	8.92	9.25	11.45	20.33	20.98	22.24
CaO	43.28	52.36	47.22	54.95	54.56	41.54	33.99	37.19	37.15	39.71	37.98	28.85	21.02	23.78
Na <sub>2</sub> O	0.06	0.11	0.07	0.02	0.11	0.02	0.02	0.06	0.05	0.04	0.05	0.06	0.04	0.05
K <sub>2</sub> O	0.2	0.21	0.09	0.07	0.09	0.09	0.07	0.67	0.91	0.53	0.48	0.02	0.02	0.01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.09	0.09	0.26	0.03	0.05	0.06	0.05	0.05	0.09	0.03	0.06	<нпо	<нпо	<нпо
H <sub>2</sub> O	0.38	0.36	0.47	0.58	0.49	0.4	0.33	0.27	0.36	0.32	0.23	0.39	0.48	0.33
пшп	2.4	2.22	2.0	0.77	1.48	1.15	1.1	1.7	1.7	1.69	1.01	1.67	4.73	2.9
CO <sub>2</sub>	41.17	40.21	41.66	42.27	41.72	43.37	44.58	39.55	37.73	39.93	41.25	43.2	30.25	35.61
SO <sub>3</sub>	<нпо	0.05	0.13	<0.05	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SrO	0.13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Сумма	100.19	100.25	99.89	100.49	100.35	99.69	99.59	100.09	99.62	99.86	100.0	100.29	99.96	99.96

Примечание: доломитизированные известняки улунгуйской свиты из п. Охотничья (1 - 5) и п. Хрустальная (6 - 11); доломиты камчадалской свиты из п. Большая Онетская (12-15); <нпо – содержание компонента ниже пределов обнаружения, прочерк – компонент не определялся.

вует современному натечному минералообразованию. Только в районе верхнего входа были обнаружены мелкие кораллиты (до 3 мм), сложенные лансфордитом и моногидрокальцитом.

### Ледяные образования

В пещере Хрустальной, вследствие сложной морфологии пещеры, сочетающей в себе вертикальную (крупный входной колодец) и горизонтальную части, наблюдаются различные типы льда. Дно входной воронки закрыто массивной наледью смешанного осадочно-метаморфического и конжеляционного происхождения. Механизм формирования наледи связан с сезонными осадками, в зимнее время в воронку поступает снег, а в теплые периоды – талые и дождевые воды. Наледь имеет двухслойное строение – верхнюю и нижнюю части, разделенные трещиной.



**Рис. 3.** Вход в п. Хрустальная в 2009 г. Видно трещину в наледи и крупную полость во льду у стенки воронки, через которую удалось проникнуть в пещеру

Как видно на рис. 3 на момент открытия пещеры максимальная ширина трещины составляла 0,5 м. Образование горизонтальной трещины было связано с формированием льда в изолированных условиях и растрескиванием при промерзании. При оттаивании плотность сцепления в боковых поверхностях глыбы льда снижалась и под действием гравитации её нижняя часть обрушилась. Открытая трещина стала проводником талых теплых

вод, что привело к усилению гидрогенного оттаивания и образованию крупной (около 1 м) полости у стенки воронки, через которую и удалось проникнуть в пещеру. В последующие годы в нижней части наледи отмечался рост мощности льда и осенью 2012 г. лёд практически полностью заполнил вход в пещеру (рис. 4). К осени 2014 г. мощность льда увеличилась еще примерно на 20 см, оставляя пещеру закрытой. Увеличение мощности льда могло быть обусловлено большим объемом накопившегося зимой снега в воронке, его увлажнением и уплотнением с последующим образованием коры конжеляционного льда.



**Рис. 4.** Вход в п. Хрустальная в 2012 г. Видно, насколько сузилась трещина, а полость у стенки воронки превратилась в небольшое отверстие во льду (примерно 20 на 20 см)

Нижняя часть пещеры характеризуется широким развитием конжеляционных ледяных образований: сталактиты длиной до 2 м; сталагмиты высотой до 1 м (рис. 5); коры на стенах; ледяной водопад во входном колодце; наледь с толщиной льда до 4 м.

В верхней части пещеры лед практически отсутствует, встречаются лишь остатки многолетней наледи в основании галереи, а также сезонных покровов и сталактитов. В формировании состава ледяных образований в п. Хрустальная принимают участие подземные воды зоны аэрации, имеющие невысокую минерализацию и состав, характерный для данного типа вмещающих горных пород (извест-

няки и доломиты улунтуйской свиты; табл. 1).



**Рис. 5.** Нижний этаж в п. Хрустальная. Крупный сталагмит и сталактиты над ним

По химическому составу наледеобразующие воды из п. Хрустальная близки к ранее изученным льдам п. Охотничья. Химический состав наледеобразующих вод из п. Хрустальная гидрокарбонатный кальциевый, величина минерализации изменяется незначительно – от 76,87 до 77,38 г/дм<sup>3</sup>, рН – от 7,1 до 8,7 (табл. 2).

В п. Большая Онотская сезонные ледяные образования конжеляционного генезиса наблюдаются в крупном центральном гроте: сталактиты, сталагмиты (рис. 6), ледяные коры на стенах и на полу. Лед в пещере формируется за счет просачивания воды сквозь кровлю по системе трещин, а также через верхний вход. Состав наледеобразующих вод из Большой Онотской пещеры гидрокарбонатный магниевый, с более высокой минерализацией – до 148,85 г/дм<sup>3</sup>, которая вызвана взаимодействием подземных вод с более магниезиальными доломитами камчадальской свиты (табл. 2).

### Минеральный состав и морфология криогенных образований

Криогенные образования в п. Хрустальной распространены повсеместно, образуя наибольшие скопления в нижней части пещеры у подножья сталагмитов, крупных сосуль, в нишах и на полочках вытаивания (рис. 7).



**Рис. 6.** Сталагмиты в п. Большая Онотская. Видно осыпавшиеся с поверхности льда на камень криогенные образования – белый порошок

Для исследования минерального состава были отобраны пробы криогенного вещества в различных точках пещеры, начиная с поверхности наледи в привходовой части и заканчивая поверхностью ледяного сталагмита в наиболее удаленной от входа части пещеры. По результатам термического и рентгенофазового анализа криогенные образования п. Хрустальной сложены смесью минералов лансфордита и икаита. В пробах, взятых в привходовой части пещеры, наблюдалась также примесь обломочного материала вмещающих пород и растительных остатков, хорошо заметная под бинокулярным микроскопом.

На электронном сканирующем микроскопе были исследованы две пробы: первая взята в привходовой части пещеры из скопления криогенной муки на поверхности наледи, вторая на нижнем этаже пещеры из размокшей криогенной массы в лужице талой воды в нише на ледяной колонне.

В составе первой пробы превалирует пятиводный карбонат магния – лансфордит ( $MgCO_3 \cdot 5H_2O$ ). Это крупные (до 200 мкм) таблитчатые кристаллы, образованные гранями ромбической призмы и двух пинакоидов (рис. 8).

На многих кристаллах лансфордита имеются гипсовые листоватые обрастания и присыпка барита с содержанием стронция до 3 мас. % (рис. 9).

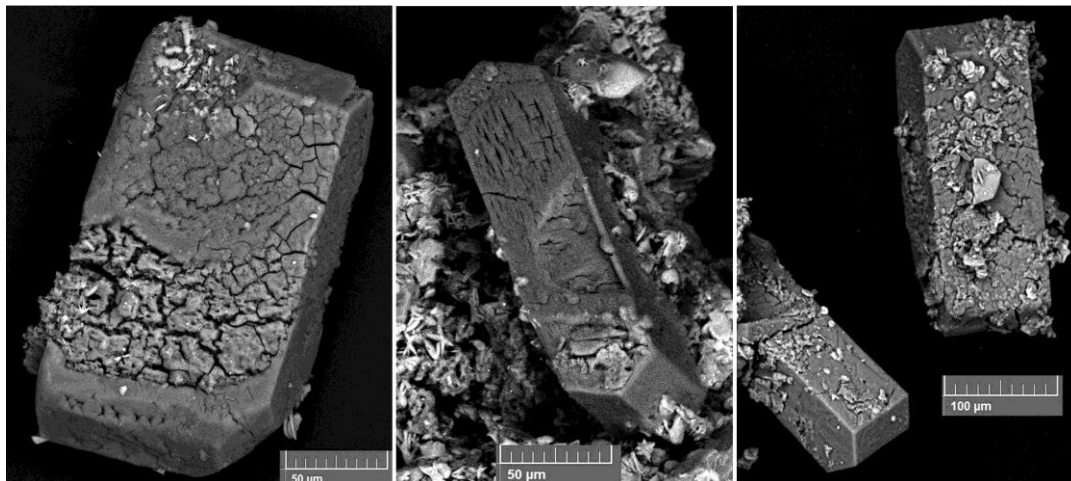


**Рис. 7.** Пещера Хрустальная. Криогенные образования на полочке вытаивания у подножия ледяного водопада

В небольшом количестве присутствуют кристаллы икаита размером до 30 мкм. В составе второй пробы обнаружены в основном кристаллы икаита размером до

50 мкм (рис. 10, а). У некоторых кристаллов наблюдается ровная поверхность — основание, на котором происходило отложение минерала. Формирование основания было вызвано, как видно, обезвоживанием и переходом икаита в кальцит. В составе пробы также отмечаются крупные уплощенные кристаллы лансфордита длиной до 200 мкм, образованные главным образом гранями пинакоида (рис. 10, б). Уплотнение кристаллов было вызвано смачиванием талой водой криогенного материала данной пробы.

В п. Большая Онетская криогенная мука покрывает поверхность ледяных сталагмитов в гроте, при сильном испарении льда в весеннее время осыпается и формирует небольшие скопления у их основания (рис. 6).



**Рис. 8.** Криогенные образования из п. Хрустальная, проба 1 (с поверхности наледи). Таблитчатые кристаллы лансфордита

Для исследования минерального состава были взяты пробы криогенного вещества с поверхности ледяных сталагмитов.

По результатам рентгенофазового анализа криогенные новообразования сложены преимущественно лансфордитом, иногда с примесью икаита и кальцита со следами гидромагнезита.

Икаит представлен корочками с плоской поверхностью, агрегатами, состоящими из игольчатых, пластинчатых и волокнистых индивидов. Наличие на некоторых

сростках плоского основания может говорить о кристаллизации минеральных фаз на поверхности льда (рис. 11).

Лансфордит представлен «ватообразными» субскелетными агрегатами лансфордита с примесью гидромагнезита и икаита (рис. 12, а, в).

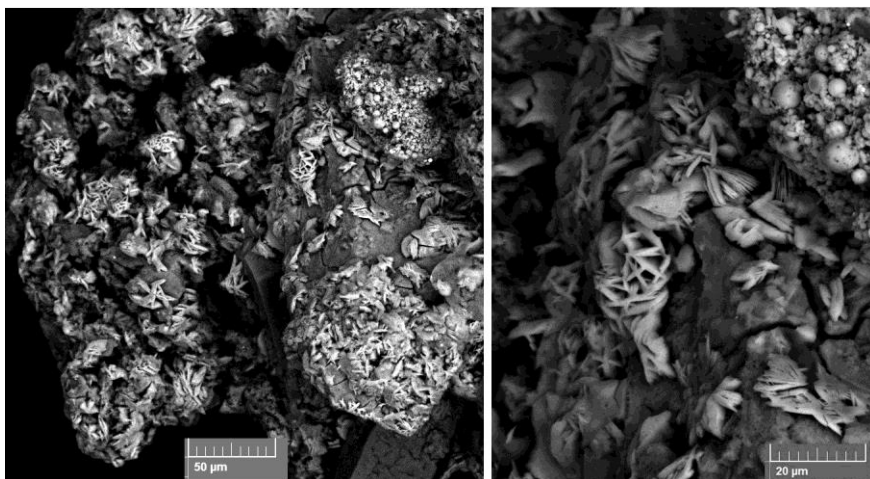
Кальцит нарастает в виде кристаллов треугольного сечения на рыхлые субскелетные агрегаты лансфордита с коррозионной поверхностью (рис. 12, а). Отдельные агрегаты лансфордита имеют элементы футляровидного строения (рис. 12, б),

Таблица 2. Химический состав и минерализация ледяных образований пещер Охотничья, Хрустальная и Большая Онотская

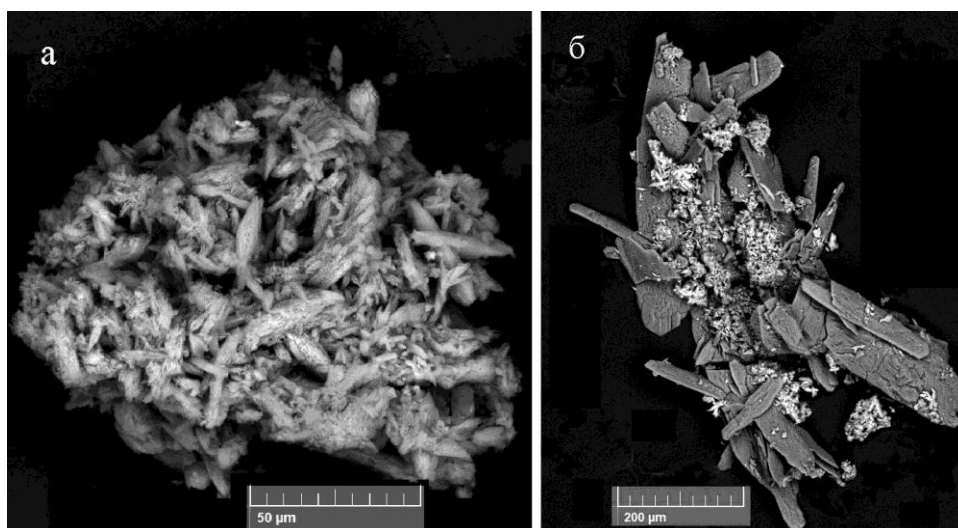
№ пробы	Минерализация, мг/л	рН		Содержание компонентов											
				NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	NO <sup>2-</sup>	NO <sup>3-</sup>	
1	49.53		мг/л		0.11	0.04	0.12	10.42	0.71	<2.0	37.83	0.3			
		8.4	мг-экв/л		0.003	0.002	0.01	0.52	0.02		0.62	0.01			
			%-экв		0.53	0.33	1.87	97.28	3.08		95.38	1.54			
2	76.87		мг/л	-	0.67	0.49	0.24	15.63	1.77	2.37	53.7	-	-	-	
		7.8	мг-экв/л		0.02	0.02	0.02	0.78	0.05	0.05	0.88				
			%-экв		2.04	2.54	2.39	93.03	5.11	5.04	89.86				
3	77.38		мг/л	0.3	0.36	0.81	0.61	15.03	2.84	<2.0	53.7	-	0.3	0.44	
		7.1	мг-экв/л	0.02	0.01	0.04	0.05	0.75	0.08		0.88		0.01	0.01	
			%-экв	1.93	1.07	4.09	5.81	87.1	8.22		90.38		0.67	0.73	
4	77.3		мг/л	0.17	0.28	0.15	1.58	15.43	1.77	2.0	51.26	1.2	0.02	0.44	
		8.7	мг-экв/л	0.01	0.01	0.01	0.13	0.77	0.05	0.04	0.84	0.04	0.001	0.01	
			%-экв	1.02	0.78	0.71	14.08	83.41	5.11	4.25	85.79	4.09	0.04	0.72	
5	148.85	7.25	мг/л	<0.1	0.61	0.38	12.16	15.03	1.06	4.0	112.27	-	<0.01	1.33	
			мг-экв/л		0.02	0.02	1.0	0.75	0.03	0.08	1.84			0.02	
			%-экв	-	0.88	0.93	56.11	42.08	1.52	4.22	93.18			1.09	

Примечание: 1 – образец льда (ледяной сталагмит) из п. Охотничья; 2-4 – образцы льда из п. Хрустальная (2, 3 – пробы современной ледяной коры, взятой в привходовой воронке; 4 – проба древнего льда из остатков протаявшей ледяной пробки), 5 – образец льда из п. Большая Онотская (ледяной сталагмит).

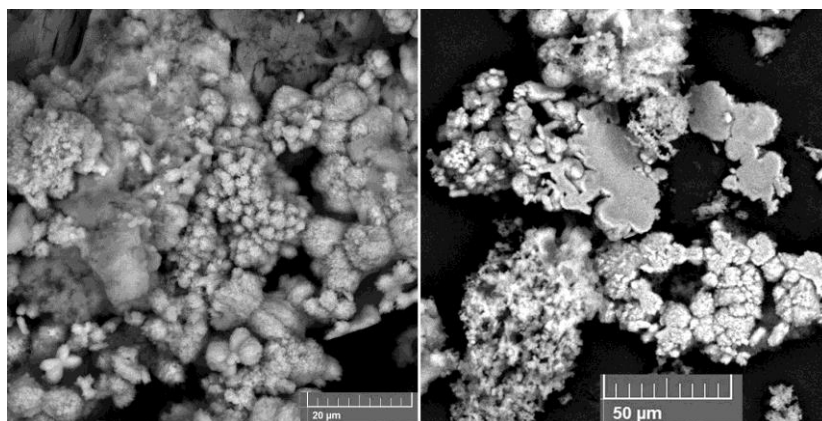




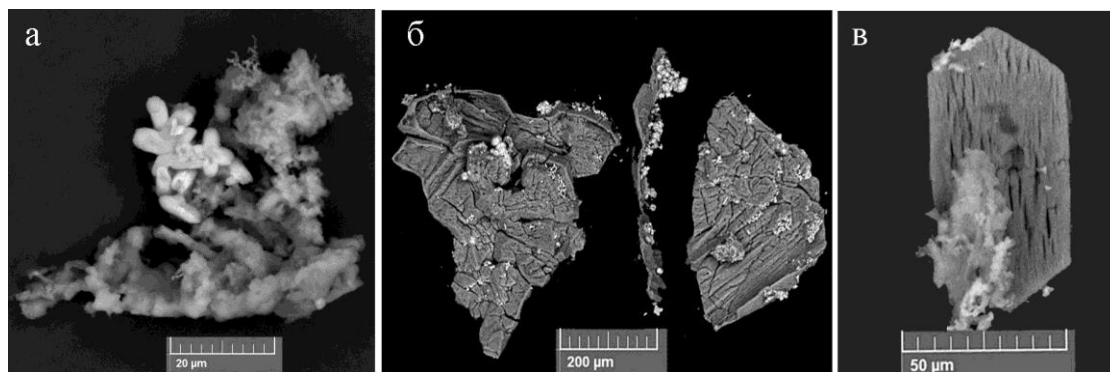
**Рис. 9.** Криогенные образования из п. Хрустальная, проба 1 (с поверхности наледи). Листоватые кристаллы гипса и баритовая присыпка на поверхности кристаллов лансфордита



**Рис. 10.** Криогенные образования из п. Хрустальная, проба 2 (из лужицы талой воды на полочке вытаивания). Микрористаллы кальцита по индивидам икаита (а) и уплощенные кристаллы лансфордита (б)



**Рис. 11.** Криогенные образования из п. Большая Оютская. Слева – агрегаты расщепленных (в некоторых случаях до сферолитов) апоикаитовых кристаллов. Справа – икаитовые корочки с плоским основанием



**Рис. 12.** Криогенные образования из п. Большая Онотская. Кристаллы кальцита на субскелетных агрегатах лансфордита (а), футляровидные кристаллы лансфордита (б) и таблитчатые кристаллы лансфордита (в)

что позволяет предполагать их рост в тонком слое воды, когда края кристаллов доращивались в маломощной пленке растворов за счет поверхностного натяжения.

Среди «ватаобразных» агрегатов встречаются одиночные таблитчатые (рис. 12, в) кристаллы лансфордита, что говорит о их формировании в стабильных фациальных обстановках минералообразования.

### Обсуждение

На сегодняшний момент икаит  $\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  можно считать распространенным криогенным минералом для пещер Урала [3] и Прибайкалья. В пещерах Прибайкалья он образует как мелкозернистые образования (от 5 мкм), так и крупные агрегаты (до 3 см) [2].

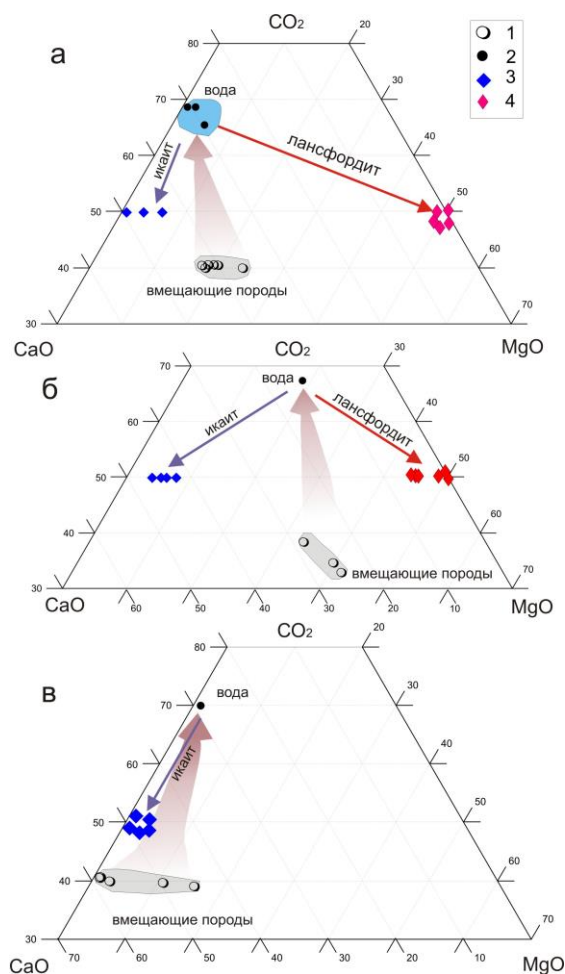
Лансфордит – малораспространенный пещерный минерал, который был обнаружен в следовых количествах в составе мондмилха в Castleguard Cave [6] и в виде белой тонкозернистой массы в ассоциации с гидромагнезитом в Valea Rea Cave [8]. По экспериментальным данным [7], рост лансфордита из насыщенного раствора бикарбоната магния происходил при температуре  $15^\circ\text{C}$  одновременно с несквегонитом; при температуре раствора  $0^\circ\text{C}$  лансфордит становится единственным кристаллизующимся минералом.

Состав подземных льдов напрямую зависит от состава вмещающих пород (рис. 13), и повышение концентрации оксида магния в составе вмещающих пород ведет к увеличению концентрации ионов магния в составе подземных льдов (табл 1, 2).

В пещерах Хрустальная и Большая Онотская лансфордит является преобладающим минералом в составе криогенной муки и имеет размеры кристаллов до 400 мкм. В процессе исследования было зафиксировано, что лансфордит в исследованных пещерах образуется при температуре  $0^\circ\text{C}$ , что подтверждает ранее полученные экспериментальные данные [7].

В таблице химического состава наледообразующих вод можно видеть, что содержание ионов магния увеличивается от 0,12 мг/л во льду сталагмита из п. Охотничья до 0,24 – 1,58 мг/л из наледи п. Хрустальной и 12,16 мг/л во льду сталагмита из п. Большая Онотская. В п. Охотничьей криогенные образования сложены исключительно икаитом, в п. Хрустальной – лансфордитом и икаитом, а в криогенных образованиях п. Большой Онотской лансфордит является преобладающим минералом.

Таким образом, кристаллизация икаита из раствора уменьшает преобладающее содержание  $\text{CaO}$ , создавая тем самым благоприятную обстановку для кристаллизации магниевых минералов.



**Рис. 13.** Молекулярное соотношение  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  и  $\text{CO}_2$  во вмещающих карбонатных породах, наледях и криогенных минералах в пещерах Хрустальная (а), Большая Онетская (б) и Охотничья (в): 1 – вмещающие породы, 2 – наледообразующие воды, 3 – икаит, 4 – лансфордит

## Заключение

В пещере Хрустальной развиты многолетние наледи конжеляционного и осадочно-метаморфического происхождения. В Большой Онетской пещере наблюдается сезонное оледенение.

Криоминеральные образования п. Хрустальная локализованы в нижней части пещеры и в нижней части ледяного водопада, что, по-видимому, объясняется следующим: при формировании льда движение воды по поверхности наледей приводило к увеличению минерализации растворов.

Несмотря на то, что в пещере лед сохраняется на протяжении ряда лет, наблюдаются сезонные колебания мощности наледей, связанные с испарением и таянием льда, вследствие чего меняется объем криоминеральных образований и происходят их вторичные изменения.

В Большой Онетской пещере криоминералы накапливаются в местах, где в зимний период образуются сезонные наледи.

В процессе накопления льда в обеих пещерах формируется криогенная существенно карбонатная мука, сложенная лансфордитом и икаитом с примесью гипса и барита. Лансфордит является преобладающим минералом и впервые зафиксирован как криогенный.

Икаит представлен корочками с плоской поверхностью, агрегатами, состоящими из игольчатых, пластинчатых и волокнистых индивидов. Расчет молекулярного соотношения  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  и  $\text{CO}_2$  во вмещающих карбонатных породах, наледях и криогенных минералах в пещерах Хрустальная, Большая Онетская и Охотничья позволил показать, что кристаллизация икаита из раствора уменьшает преобладающее содержание  $\text{CaO}$ , создавая тем самым самую благоприятную обстановку для кристаллизации магниевых минералов.

Были выявлены различия в морфологии криогенных выделений лансфордита, которые зависят главным образом от внутренних фациальных условий минералообразования. При формировании криогенных минералов в тонкой пленке водного раствора на поверхности льда или при смачивании минеральных зерен водой вследствие таяния льда возникают уплотненные кристаллы и агрегаты с плоским основанием. Минеральные зерна, освобожденные из наледи исключительно за счет испарения льда, не имеют каких-либо вторичных преобразований.

В составе криогенных образований пещер Байкальского региона впервые был найден барит.

Работа выполнена с помощью оборудования Центра коллективного

пользования «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН (Иркутск).

Авторы благодарят аналитиков Института земной коры СО РАН З.Ф. Ущуповскую, Н.В. Нартову, М.М. Самойленко, Г.В. Бондареву и Л.А. Дурбан, аналитика Горного института УрО РАН в г. Перми О.В. Коротченко за проделанные анализы, а также спелеологов клуба «Арабика» и лично А.В. Осинцева за предоставленную топо съемку, фотографии и помощь в сборе образцов.

#### Библиографический список

1. Базарова Е.П. Криоминеральные образования пещер Мечта и Ая в Западном Прибайкалье // Комплексное использование и охрана подземных пространств: мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. / ГИ УрО РАН. Пермь, 2014. С. 30.
2. Базарова Е.П., Кононов А.М., Гутарева О.С., Нартова Н.В. Особенности криогенных минеральных образований пещеры Охотничья в Прибайкалье (Иркутская область) // Криосфера Земли. 2014. Т. XVIII, №3. С. 67-76.
3. Кадебская О.И., Чайковский И.И. Минералогическая и изотопная типизация карбонатных образований пещер Западного Урала // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: Науч. чтения памяти П.Н. Чирвинского: сб. науч. ст. Пермь, 2013. Вып. 16. С. 303-311.
4. Филиппов А.Г. Геология пещер побережья озера Байкал // Proceedings, Vol. 2, 10<sup>th</sup> International Congress of Speleology (13-20 August 1989). Budapest, 1989. С. 583-585.
5. Филиппов А.Г. Пещерные льды Иркутской области // Свет. Вестник Киевского карст.-спел. центра. Киев, 1997. №2(17). С. 13-16.
6. Harmon R.S., Atkinson T.C., Atkinson J. L. The mineralogy of Castleguard Cave, Columbia icefield, Alberta, Canada // Arctic and Alpine Research. 1983. Vol. 15, №4. P. 503-516.
7. Hill R.J., Canterford J.H., Moyle F.J. New data for lansfordite // Mineralogical magazine. 1982. Vol. 46. P. 453-457.
8. Onac B.P. Minerals of the Carpathians: first update // Acta Mineralogica-Petrographica. Abstract Series 1. Szeged, 2003. P. 79.

## 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)

**E.P. Bazarova<sup>a</sup>, O. I. Kadebskaya<sup>b</sup>, A.M. Kononov<sup>b</sup>, Z.F. Ushchapovskaya<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>Institute of the Earth Crust of Siberian Branch of the Russian Academy of Science. 128 Lermontova Str., Irkutsk 664033, Russia.

E-mail: bazarova@crust.irk.ru

<sup>b</sup>Mining Institute of Ural Branch of the Russian Academy of Science. 78A Sibirskaya Str., Perm 614007, Russia. E-mail: icecave@bk.ru

Authors present the new data on the cryogenic mineral formation in the caves of Pre-Baikal region and Eastern Sayan. The mineral composition of cryogenic forms is represented by lansfordite and ikaite with gypsum and barite impurities. The results of calculation of the molecular ratio CaO, MgO and CO<sub>2</sub> of the host carbonate rock, ice crust, and cryogenic minerals suggested that crystallization of ikaite from the solution reduces the CaO content, thereby producing the favorable conditions for magnesium minerals crystallization. It was revealed that the flattened ice crystals and aggregates with a flat bottom appears due to formation of cryogenic lansfordite precipitates in a thin film of water solution on the ice surface, or by wetting the mineral grains with water in result of

ice melting. Mineral grains released from the ice crust by evaporation have no secondary transformations. Lansfordite was encountered as a cryogenic mineral at first time. It was the first finding of barite as part of cryogenic formations in the caves of Baikal region.

Key words: *caves, cryogenesis, Pre-Baikal region, Eastern Sayan, lansfordite, ikaite.*

## References

1. *Bazarova E.P.* 2014. Kriomineralnye obrazovaniya peshcher Mechta i Aya v Zapadnom Pribaykalie [Cryomineral formations of Mechta and Aya caves in Eastern Pre-Baikal region]. In *Kompleksnoe ispolzovanie i okhrana podzemnykh prostranstv*. Mining Inst. UrO RAN, Perm, p. 30. (in Russian)
2. *Bazarova E.P., Kononov A.M., Gutareva O.S., Nartova N.V.* 2014. Kharakteristika kriogenykh mineralnykh obrazovaniy Okhotnichyey peshchery v Pribaykalie (Irkutskaya oblast) [Characteristics of cryogenic mineral formations of Okhotnichya Cave at Pre-Baikal area (Irkutsk region)] In *Criosphera zemli*. XVIII(3): 67-76. (in Russian)
3. *Kadebskaya O.I., Chaykovskiy I.I.* Mineralogicheskaya i izotopnaya tipizatsiya karbonatnykh obrazovaniy peshcher Zapadnogo Urala [Mineralogical and isotopic typification of carbonate forms in the caves of Western Urals]. In *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii: nauch. chteniya pamyati P.N. Chirvinskogo*. Perm. 16: 303-311 (in Russian).
4. *Filippov A.G.* 1989. Geology of caves on the Baikal Lake shore. Proceedings of 10<sup>th</sup> International Congress of Speleology (13 – 20 August 1989). Budapest. Vol. 2, pp. 583-585.
5. *Filippov A.G.* 1997. Peshchernye ldy Irkutskoy oblasti [Cave ices of Irkutsk region]. *Svet. Vestnik Kievskogo karst.-spel.* Tsentra. Kiev. 2(17): 13-16. (in Russian)
6. *Harmon R.S., Atkinson T.C., Atkinson J.L.* 1983. The mineralogy of Castleguard Cave, Columbia icefield, Alberta, Canada. *Arctic and Alpine Research*. 15(4): 503-516.
7. *Hill R.J., Canterford J.H., Moyle F.J.* 1982. New data for lansfordite. *Mineralogical magazine*. 46: 453-457. doi: 10.1180/minmag.1982.046.341.08
8. *Onac B.P.* 2003. Minerals of the Carpathians: first update. *Acta Mineralogica-Petrographica*. Szeged 2003, 44: 31-34.