

УДК 556. 383.

МИНЕРАЛЬНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ ПЕЩЕРЫ ПОБЕДА (БАШКОРТОСТАН), СВЯЗАННЫЕ С ФОРМИРОВАНИЕМ И ОТТАИВАНИЕМ МНОГОЛЕТНЕГО ЛЬДА

© 2014 г. О.И. Кадебская, И.И. Чайковский

Горный институт Уральского отделения РАН

Поступила в издательство 11.09 2012 г.

В пещере Победа формируются два типа карбонатной минерализации, связанные с многолетней наледью. Первый тип формировался при быстром замерзании растворов и является криогенным. Второй тип минерализации связывается с размораживанием и собирательной перекристаллизацией оттаявшего криогенного материала. Находка нового типа пещерного “жемчуга”, не известного в пещерах России, подчеркивает уникальность пещеры Победа и необходимость ее сохранения для научных исследований.

Введение. В 2011 г. сотрудниками Горного института УрО РАН проведено комплексное изучение привходовой части пещеры, позволившее установить следующее. В привходовой части пещеры расположена многолетняя наледь длиной 120 м, шириной от 5 до 12 м, мощность которой, по данным георадарных исследований [3], достигает 6 м. Температура на границе холодной и переходной зон в летнее время (июль, 2011 г.) колеблется приблизительно около 0 °С. На поверхности наледи кроме костей летучих мышей и крупных обломков известняка зафиксированы мучнистый материал, распространенный на всей площади, а также похожие на пещерный “жемчуг” образования, пластинчатые отщепы известняка и натечных кор, локализованные близ переходной зоны. “Жемчуг” также установлен в нишах стен на высоте от 0.5 до 1.5 м. Приуроченность большого количества отщепов к краевой части наледи может говорить о проявлении десквамации (шелушение и отслаивание горных пород), связанной с периодическим замерзанием воды на стенах переходной зоны. Пространственная связь новообразованного материала (“муки” и “жемчуга”) с многолетней наледью в пещере позволяет предполагать, что их образование отличается от традиционных натечных объектов (спелеотем), формирующихся при положительной температуре [5].

Краткая характеристика пещеры. Пещера Победа (Киндерлинская им. 30-летия Победы) – самая значительная по высотной амплитуде

(215 м) и третья по длине (9113 м) пещера Урала. Она находится в Гафурийском районе Башкортостана, в устьевой части левого притока р. Зилим – р. Киндерля. Она заложена в девонских битуминозных известняках. Вход в пещеру расположен на южном склоне карстового массива. Пещера представляет собой наклонную систему галерей и ходов, развитых в северном, северо-восточном и северо-западном направлениях, образующих четыре уровня. Пещера привлекательна для спелеотуризма, находится в доступном месте и активно посещается туристами с 1980-х гг. XX в. (более чем 1000 чел./год).

Методика исследований и характеристика отобранного материала. Были отобраны пробы карбонатного материала из краевой части наледи на границе с переходной зоной (пробы 1, 2), в центральной части наледи с поверхности (проба 3) и из ледяного массива с глубины 1 м при помощи ледобура (скв. 1, 2). Схожие с пещерным жемчугом образования размером до 7 мм присутствовали в пробах 1 и 2 (рис. 1–3). Первая проба была взята у восточной стены на поверхности краевой части наледи. Вторая проба была отобрана на высоте 1 м из ниши на стене. Карбонатная мука присутствовала в пробах 1 и 3, а также отфильтровывалась из оттаявшего льда (скв. 1, 2).

Исследование морфологии и химического состава проводилось на сканирующем электронном микроскопе VEGA 3 LMN с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа INCA

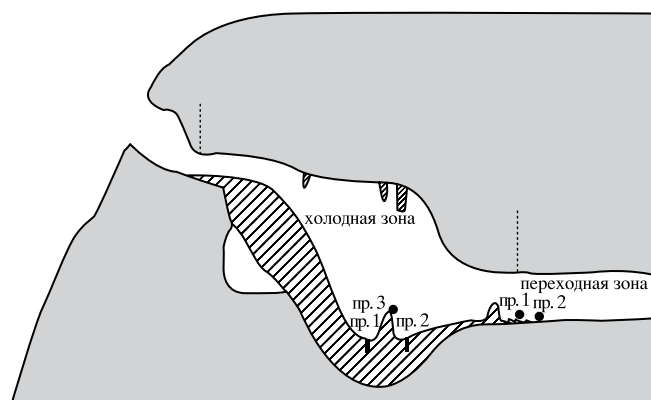


Рис. 1. Места отбора льда и минеральных образований из привходовой части пещеры.

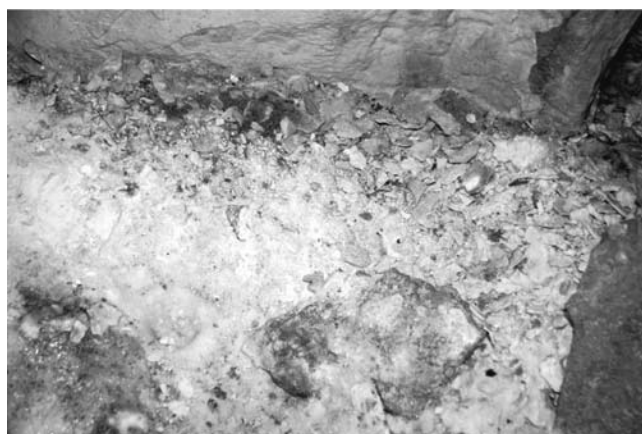


Рис. 2. Краевая часть наледи, покрытая десквамационными отщепами известняка, "мукой" и "жемчугом" (проба 1).

Energy 350/X-max 20 в Горном институте УрО РАН (аналитики Е.П. Чиркова, О.В. Коротченкова).

Изотопные анализы углерода и кислорода из образцов вмещающего известняка, "муки" и "жемчуга" были выполнены в Институте геологии КНЦ УрО РАН на масс-спектрометрах МИ-1309 (аналитик М.А. Кудинова) и DELTA V Advantage (аналитик И.В. Смолева). Значения рассчитаны в промилле относительно стандартов PDB для $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$.

Химический анализ льда выполнен в Горном институте УрО РАН (аналитик Т.А. Одинцова).

Химический анализ льда показал низкую минерализацию состава льда и некоторое ее увеличение от входа в глубь пещеры (от 185.0 до 224.5 мг/дм³), при этом происходит рост pH и содержания всех макрокомпонентов, кроме хлора. Исходя из этого, по классификации Г.А. Максимовича лед в пещере пресный (табл. 1).

Его низкая минерализация связывается с образованием наледи из талой воды, поступающей в весеннее время преимущественно через вход пещеры. Поведение основных компонентов отражает ее постепенное вымораживание в процессе затекания.

Гидрохимический тип определялся по компонентам, содержание которых превышало



Рис. 3. Пещерный "жемчуг" в нише на высоте 1 м (проба 2).

20% мг.экв. Натечный лед относится к гидрокарбонатно-кальциевому типу.

Морфология минеральных образований. Исследование минеральных фаз показало, что морфология мучнистого материала и "жемчуга" аналогична во всех пробах.

Анализ морфологии более 400 тонкодисперсных частиц из **мучнистого материала** показал,

Таблица 1

№ скв.	Минерализация, мг/дм ³	pH	Содержание, мг/дм ³ , моль/дм ³ , %-экв						Тип
			HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	Mg	K + Na	
1	185.00	7.6	126.81	2.88	8.41	32.26	3.28	11.36	ГК
			2.08	0.08	0.18	1.61	0.27	0.45	
			44.51	1.74	3.75	34.48	5.78	9.73	
2	224.49	8.21	155.79	1.97	9.34	37.27	3.28	16.83	ГК
			2.55	0.06	0.19	1.86	0.27	0.67	
			45.54	0.99	3.47	33.18	4.82	12.01	

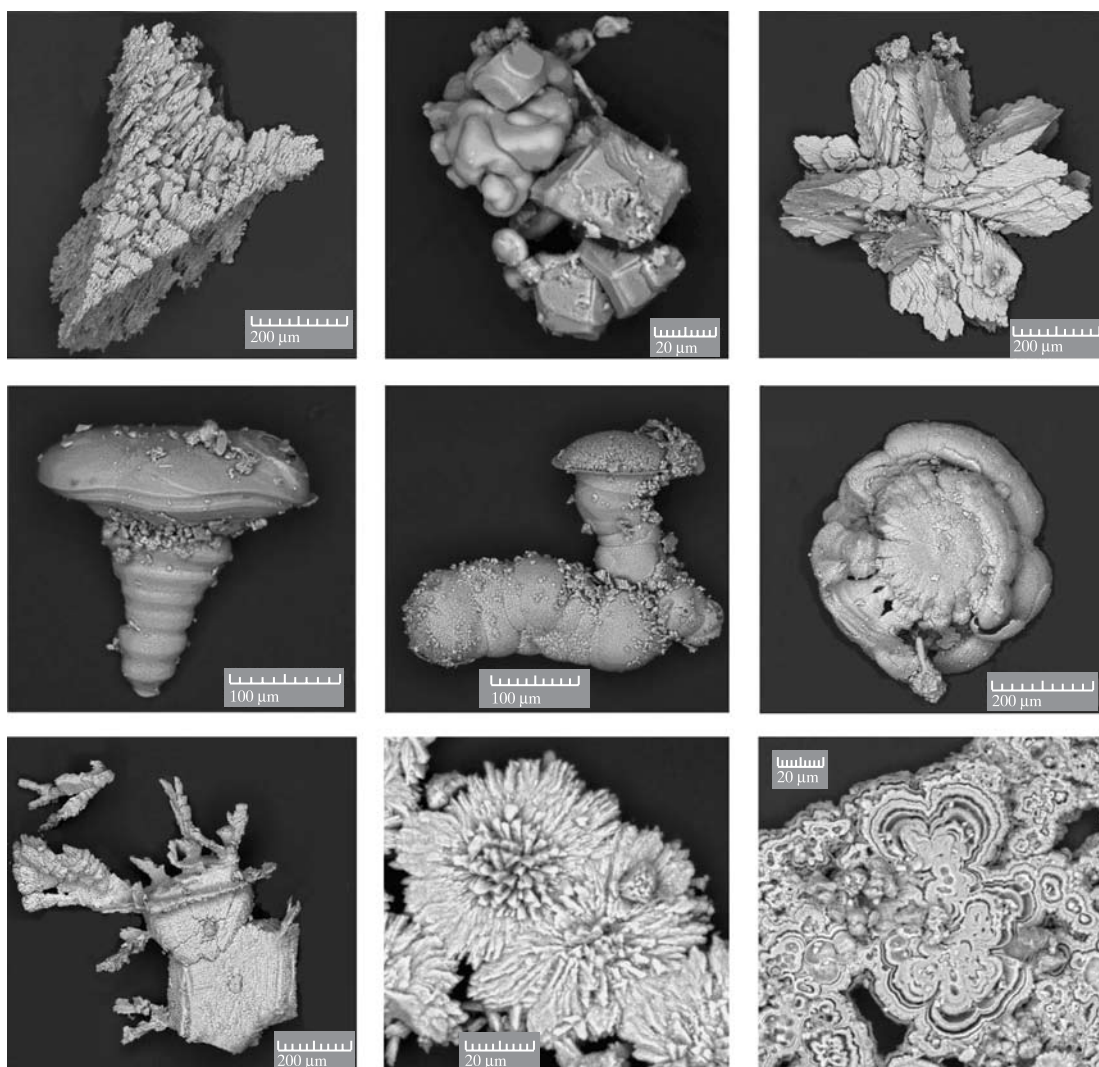


Рис. 4. Морфология микрокристаллов и агрегатов из карбонатной муки.

что они представлены гладкогранными, скелетными и антискелетными кристаллами острого и тупого ромбоэдров кальцита, их сростками, расщепленными кристаллами, сферолитами, древовидными дендритами, фрагментами почковидных агрегатов – сферолитовыми корками (рис. 4). Их размер варьируется от 40 до 600 мкм. Некоторые агрегаты имеют ровную поверхность основания, которая, вероятнее всего, образовалась на поверхности льда.

В сростках с кальцитом отмечены гидроксиды железа, глобулы силикагеля, а также силвин, который связывается с вскрытием жидких включений в вакуумной камере микроскопа. В качестве ксеногенных фаз отмечены обломочные зерна монацита, циркона, кварца и оксиды титана.

Анализ морфологии тонкодисперсных частиц кальцита и известные представления о связи формы индивидов с концентрацией растворов [1]

позволили ранжировать их в морфологический ряд, отражающий степень пересыщения замерзающей воды (рис. 5). Предполагается, что при незначительном пересыщении зародыши минералов – микролиты преобразуются в более крупные плоскогранные индивиды, а при значительном – происходит постепенное расщепление с формированием гантелевидных и сноповидных образований, сферолитов с неровной и гладкой поверхностью или кораллитовых агрегатов. С условиями недосыщения связывается формирование скелетных кристаллов. На поверхности наледей в основном распространены расщепленные и скелетные индивиды, сложенные комбинацией острого и тупого ромбоэдров. В ледяной толще наряду с ним зафиксированы обычные ромбоэдры с признаками антискелетного роста, что позволяет считать их специфичной формой, формирующейся в остаточной жидкости между кристаллами льда.

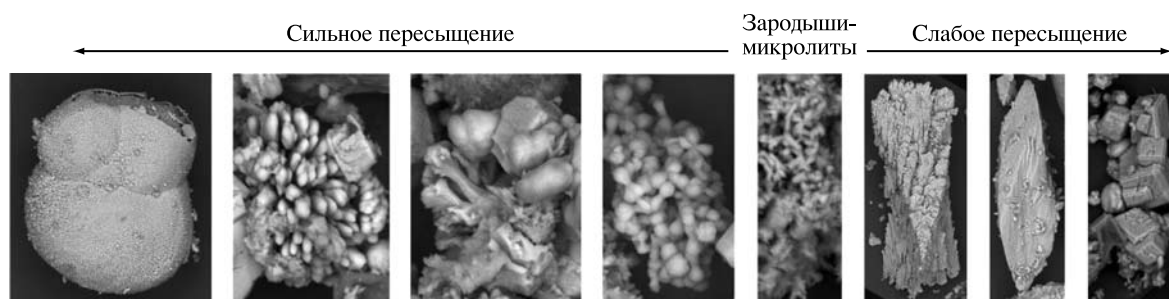


Рис. 5. Предполагаемый морфологический ряд выделений тонкодисперсных индивидов и агрегатов кальцита в зависимости от степени насыщения замерзающих растворов.

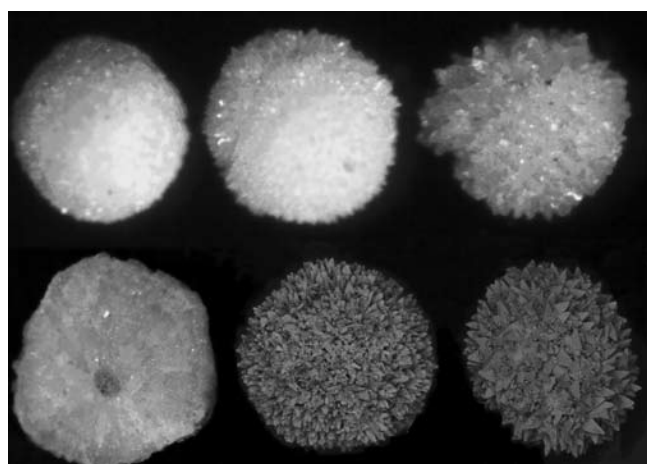


Рис. 6. Морфология и внутреннее строение сферолитов ("жемчужин").

Изучение морфологии **"жемчужин"** показало, что они представляют собой сферолиты, состоящие из плоскогранных индивидов (остро-) ромбоэдрического кальцита (рис. 6).

В центральной части некоторых жемчужин отмечается один, реже несколько центров кристаллизации, в качестве которых выступают обломочные карбонатные и глинистые частицы, кристаллы более ранней генерации, костные

остатки летучих мышей (рис. 7). Предполагается, что образование таких агрегатов могло произойти как за счет сферолитового роста расщепившихся зародышей, так и обрастания друзовидной корочкой кристаллов и костей летучих мышей.

Химический состав "муки" и "жемчуга". Для характеристики химического состава было выполнено 50 анализов минеральных образований, отобранных из льда, с поверхности наледи и ниши. В качестве примеси в кальците установлена примесь магния. Минимальное ее количество (до 1.8 ат. %) зафиксировано в "жемчужинах". Для микрокристаллов содержание магния достигает 6.15 ат. % во льду, 45.12 ат. % на поверхности наледи 47.52 ат. % в нише (рис. 8).

Пространственное положение исследованных образований и их состав позволяют предполагать, что **"жемчужины"** формировались из наиболее пресных, вероятно, талых вод только на поверхности наледи. Наиболее низкомагнезиальные микрокристаллы, извлеченные из льда, возможно, формировались из жидких включений, расположенных между кристаллами льда. Наиболее магнезиальные микрокристаллы с поверхности наледи и в нише росли в пленке раствора, состав которого за счет вымораживания становился все более и более минерализованным.

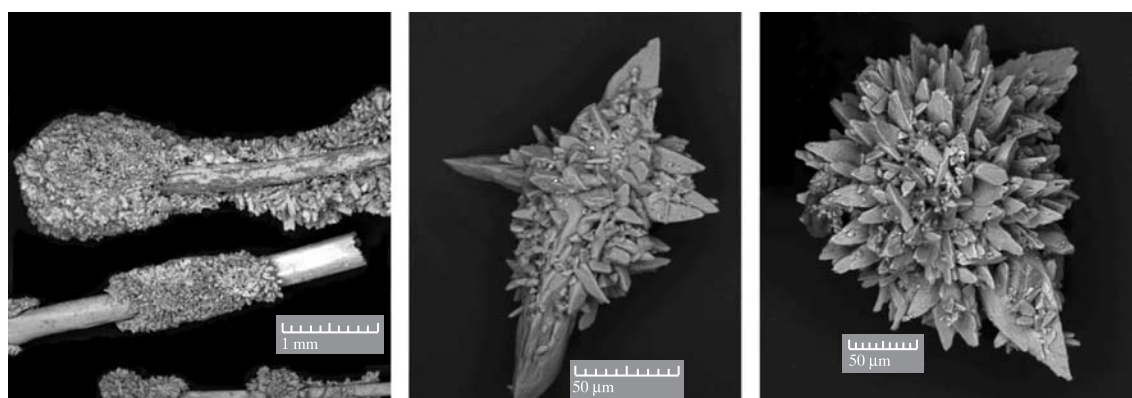


Рис. 7. Кости летучих мышей и ранние индивиды кальцита, обросшие друзовидной корочкой кальцита.

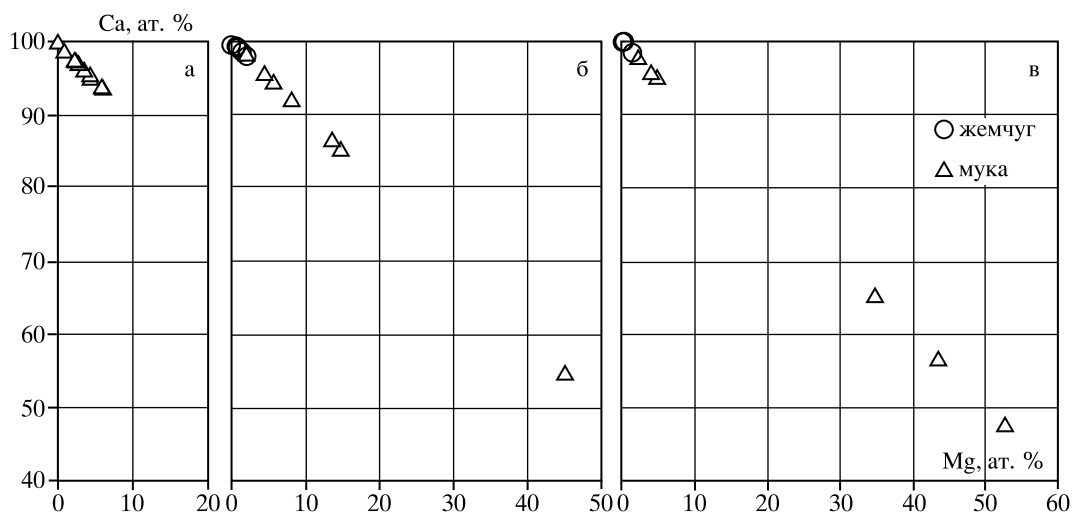


Рис. 8. Соотношение кальция и магния в минеральных фазах из льда (а), с поверхности наледи (б) и ниши (в).

Изотопный состав С и О карбонатов. Для изотопных исследований карбонатного материала были отобраны образцы вмещающего известняка, мучнистого материала и “жемчуга” (табл. 2).

Таблица 2. Изотопный состав вмещающего известняка, “муки” и “жемчужин”

№ на рис. 9	Вещество, привязка	Изотопный состав	
		$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$
1	вмещающий известняк	1.8	-3.16
2	мука с пола (проба 1)	0.5	-7.24
3	мука с поверхности наледи (проба 3)	-0.1	-7.62
4	“жемчуг” мелкий с пола (проба 1)	-3.8	-8.11
5	“жемчуг” крупный из ниши (проба 2)	-4.6	-8.40

Использование типизационной диаграммы для минеральных образований пещер Европы [4] позволило показать, что тонкодисперсный материал из льда и с его поверхности соответствует криогенной муке, а составы сферолитов попали в поле неопределенности, где могут быть представлены как криогенные конкреции, так и обычные натечные образования пещер (рис. 9).

Изотопный состав вмещающих известняков из пещеры соответствует составу типичных морских осадочных карбонатов.

Обсуждение. Совместное нахождение карбонатов, представленных как тонкодисперсным материалом, так и крупными сферолитами, различающихся по морфологии, химическому и изотопному составу, отражает различные механизмы их формирования.

Формирование мучнистого материала на поверхности и внутри ледников уже давно связывается с быстрой (шоковой) кристаллизацией минералов из замерзающей воды [8]. В процессе такого быстрого замерзания фракционирования изотопов кислорода между водой и льдом не происходит, а утяжеление состава углерода связывается с утечкой CO_2 ,

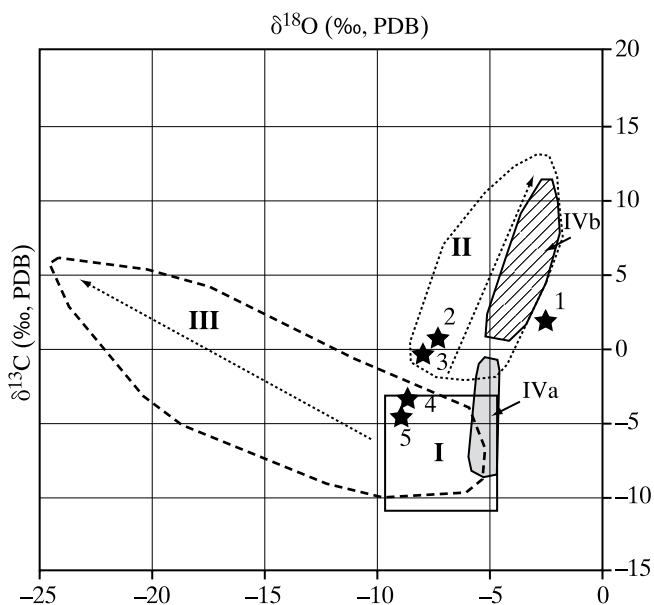


Рис. 9. Соотношение изотопов углерода и кислорода в новообразованных карбонатах из п. Победа: арабскими цифрами (1–5) показаны номера проб: 1 – вмещающий известняк; 2 – криогенная мука (проба 1); 3 – криогенная мука с поверхности льда (проба 3); 4 – “жемчуг” мелкий до 1 мм (проба 1), 5 – “жемчуг” крупный (проба 2). Римскими цифрами показаны поля минеральных образований пещер Европы [4]: I – натечных; II – криогенной “муки” с поверхности и внутри наледей; III – криогенных карбонатных конкреций; IV – минеральные образования (а – “жемчуг”, б – “мука”) из п. Скаришоара по [7].

что и объясняет обогащенность тонкодисперсного материала изотопом ^{13}C относительно обычных спелеотем.

Менее ясная картина предполагается для образований, схожих с пещерным “жемчугом”. Минеральные образования пещер, известные как “пизолиты”, представляют собой концентрически-слоистые индивиды, формирующиеся в мелких пещерных водоемах. Их преимущественно сферическая форма связывается с вращением во время роста, обусловленным падением каплюющей сверху воды [5]. Они представляют собой аналог широко распространенных в природе оолитов и по изотопному составу соответствуют натечным образованиям.

Второй тип пещерного “жемчуга” (криогенных карбонатных конкреций), характеризующегося накоплением ^{16}O , установлен в пещерах Германии, Чехии, Словакии и Польши. Он формировался в условиях медленного замерзания льда, когда в кристаллической структуре льда накапливался тяжелый изотоп ^{18}O , а остаточная вода обеднялась им. Рост криогенных карбонатных конкреций происходил в периоды таяния вечной мерзлоты и поступления воды в замороженные подземные полости [8].

Своеобразный третий тип “жемчуга”, найденный на краевой части наледи в пещере Скаришоара (Румыния), впервые был описан в 1959 г. [6]. На основе изотопных данных [7] было предположено, что осаждение карбоната кальция происходило при сезонном замерзании и таянии льда (режеляции). Сопоставление полей составов “муки” и “жемчуга” из пещеры Скаришоара показывает, что последние попадают в поле натечных образований. Однако совместное их нахождение в краевой части наледи и легкая растворимость тонкодисперсных кристаллов позволяют предполагать, что основные периоды роста “жемчужин” приходились на периоды таяния льда и насыщения растворов растворившейся криогенной “мукой”. Участие замерзания (криогенеза) в их образовании было незначительно, что и отразилось на изотопном составе.

Изотопные характеристики сферолитов и агрегатов с друзовидной каймой из пещеры Победа, их внутреннее строение и минимальное количество примеси магния также позволяют утверждать об их образовании за счет размораживания (регелогенеза, дефростации) и перекристаллизации тонкодисперсного криогенного материала, аналогично таковому в пещере Скаришоара. Смещение уральского материала влево относительно румынского, за счет обогащения легким изотопом кислорода, объясняется положением в различных климатических зонах и соответственно различной степенью фракционирования атмосферных осадков.

Выводы. В пещере Победа в пространственной связи с многолетней наледью формируются два типа карбонатной минерализации. Первый, локализованный внутри и на поверхности льда, представлен гладкогранными, скелетными, анти-скелетными и расщепленными кристаллами, их сростками, сферолитами, древовидными дендритами, почковидными агрегатами размером от 40 до 600 мкм, формировался при быстром замерзании растворов и является криогенным.

Сравнение морфологии микрокристаллов и агрегатов с подобными образованиями из других карбонатных пещер Урала [2] показало, что пещера Победа отличается наибольшим разнообразием морфологических типов. Кроме ранее описанных форм кристаллов впервые встречены ромбоэдри с признаками антискелетного роста.

Второй тип минерализации представлен сферолитами и агрегатами с друзовидной каймой размером 0.25–7 мм, он локализован на поверхности краевой части наледи, связывается с размораживанием и собирательной перекристаллизацией оттаявшего криогенного материала и является существенно регелогенной (*regelo* с латинского – *вновь оттаивать*).

Находка подобного типа пещерного “жемчуга”, не известного в пещерах России, подчеркивает уникальность пещеры Победа и необходимость ее сохранения для научных исследований.

Авторы приносят глубокую благодарность за помощь в организации и проведении полевых работ заведующему кафедрой Башкирского педагогического университета, д.г.н. Шакирову А.В.; за выполнение микроскопических и изотопных исследований Чирковой Е.П., Коротченковой О.В., Смолевой И.В. и Кудиновой М.А. Исследование проведено при поддержке грантов РФФИ № 11-05-96014-р_урал_а и № 12-У-5-1027 “Стабильные изотопы легких элементов в изучении генезиса геологических объектов”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев Д.П., Жабин А.Г. Онтогенез минералов (индивиды). М.: Наука, 1975. 340 с.
2. Кадебская О.И. Криогенные образования карбонатных пещер Урала // Стратегия и процессы освоения георесурсов: матер. ежегод. науч. сес. ГИ УрО РАН по результатам НИР в 2011 г. ГИ УрО РАН. Пермь, 2012. Вып. 10. С. 13–15.
3. Кичигин А.В. Применение георадара при исследовании ледниковых отложений пещер // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы ежегод.

- науч. сес. ГИ УрО РАН по результатам НИР в 2011 г. ГИ УрО РАН. Пермь, 2012. Вып. 10. С. 212–214.
4. Richter D.K., Meissner P., Immenhauser A., Schulte U., Dorsten I. Cryogenic and non-cryogenic pool calcites indicating permafrost and non-permafrost periods: a case study from the Herbstlabyrinth-Advent Cave system (Germany) // *Cryosphere*. 2010. № 4. P. 501–509.
 5. Hill C.A., Forti P. *Cave Minerals of the World* // Huntsville, National Speleological Soc. 1997. 463 p.
 6. Viehmann I. Příspěvky k vývoji jeskynních perel (Un nouveau processus de génèse des perles de caverne) // *Československý kras* 12 (1959), 177–185, 1960. (на чешском языке, резюме на французском).
 7. Žák K., Onac B.P., Perşoiu A. Cryogenic carbonates in cave environments // *A rev. Quat. Intern*, 187. 2008. P. 84–96.
 8. Žák K., Richter D.K., Filippi M., Zivor R., Deininger M., Mangini A., Scholz D. Cryogenic cave carbonate – a new tool for estimation of the Last Glacial permafrost depth of the Central Europe // *Climate Past Discussions* (принято в печать, май 2012).

Mineral formations of Pobeda cave (Bashkortostan) associated with the formation and thawing of multi-year ice

O.I. Kadebskaya, I.I. Chaikovsky

Mining Institute, Ural Branch, Russian Academy of Sciences

In Pobeda cave two types of carbonate mineralization associated with the multi-year frazil are formed. The first (cryogenical) type is formed during rapid freezing of solutions. The second type of mineralization is associated with defrosting and collective recrystallization of thawed cryogenic material. Discovery of new type of cave “pearls”, not known in the caves of Russia, highlights the uniqueness of the Pobeda cave and the need for its preservation for research.