



О.И. Кадебская, И.И. Чайковский

## **Стадийность гипергенной трансформации сульфатно-карбонатных толщ (на примере осыпей органных труб Кунгурской Ледяной пещеры)**

Кадебская О.И., Чайковский И.И. Стадийность гипергенной трансформации сульфатно-карбонатных толщ (на примере осыпей органных труб Кунгурской Ледяной пещеры) // Спелеология и карстология, - №4. – Симферополь. – 2010. С. 11–20

**Резюме:** В статье показано влияние микроклимата на вещественный состав отложений в гротах Кунгурской Ледяной пещеры. Объектом исследования были выбраны отложения провально-осыпных конусов под органными трубами в разных микроклиматических зонах. Было установлено, что осыпной материал одинакового состава имеет разные пути преобразования, связанные с микроклиматом. В холодной зоне отрицательные температуры «замораживают» процессы преобразования карбонатного и сульфатного материала. Основным процессом минералообразования в этой зоне является криогенная минерализация сульфатно-кальциевых вод. Переходная зона отличается наличием в осыпях аутигенных кальцитовых брекчий и многообразных форм гипса. В теплой зоне происходит полный вынос гипса и частичное растворение карбонатных обломков.

По отложениям с климатическими маркерами можно идентифицировать палеоклиматические обстановки, преобладавшие в карстовой полости.

**Ключевые слова:** карст, пещеры, микроклимат, пещерные отложения, минералообразование.

Кадебска О.І., Чайковський І.І. Стадійність гіпергенної трансформації сульфатно-карбонатних товщ (на прикладі осипів органичних труб Кунгурської Крижаної печери) // Спелеологія і карстологія, - №4. – Симферополь. – 2010. С.11–20

**Резюме:** У статті показаний вплив мікроклімату на речовинний склад відкладів у гротах Кунгурської Крижаної печери. Об'єктом дослідження були обрані відклади провально-осипних конусів під органичними трубами в різних мікрокліматичних зонах. Було встановлено, що осипний матеріал однакового складу має різні шляхи перетворення, пов'язані з мікрокліматом. У холодній зоні негативні температури «заморожують» процеси перетворення карбонатного й сульфатного матеріалу. Основним процесом мінералоутворення в цій зоні є криогенна мінералізація сульфатно-кальцієвих вод. Перехідна зона відрізняється наявністю в осипах аутигенних кальцитових брекчий і різноманітних форм гіпсу. У теплій зоні відбувається повний винос гіпсу й часткове розчинення карбонатних уламків. По відкладаннях із кліматичними маркерами можна ідентифікувати палеокліматичні обстановки, що переважали в карстовій порожнині.

**Ключові слова:** карст, печери, мікроклімат, печерні відкладання, мінералоутворення.

Kadetskaya O., Tchaikovskiy I. Stages in hypergene transformation of sulfate-carbonate sequences (on example of breakdown piles of organ pipes of Kungur Ice Cave) // Speleology and Karstology, - №4. – Simferopol. – 2010. – P. 11–20

**Abstract:** The article reveals the influence of microclimate on the composition of deposits in Kungur Ice cave. Deposits of breakdown piles under "organ pipes" in different climatic zones were investigated. It was established that the material of breakdown piles of identical initial composition has different ways of transformation related to microclimate. In the cold zone negative temperatures "freeze" transformation processes of calcium and sulfate materials. The main process of mineral formation in this zone is cryogenic mineralization of sulfate and calcium water. The transitional zone (with temperatures between 0°C and 3°C) is distinguished by the presence of authigenic calcium breccias and various gypsum forms in breakdown piles. In the warm zone complete dissolution of gypsum and partial dissolution of carbonate debris occurs. Studying deposits bearing climatic markers can be used for identifying dominant paleoclimatic conditions in the cave.

**Keywords:** karst, caves, microclimate, cave deposits, mineral formation.

## ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящего исследования было выявление влияния микроклимата в гротах Кунгурской Ледяной пещеры на вещественный состав отложений. Объектом исследования были выбраны отложения провално-осыпных конусов под органическими трубами в разных микроклиматических зонах Кунгурской Ледяной пещеры (рис. 1).

Пещера представляет собой систему горизонтальных ходов с несколькими входами на разных высотных уровнях, имеет один этаж, располагающийся на отметках (111-112 м), близких к уровням воды в р. Сылва. Длина пещеры 5,7 км, площадь 65,0 тыс. м<sup>2</sup>, а амплитуда составляет 32 м. В ней выделяют три микроклиматические зоны, характеризующиеся различными температурными

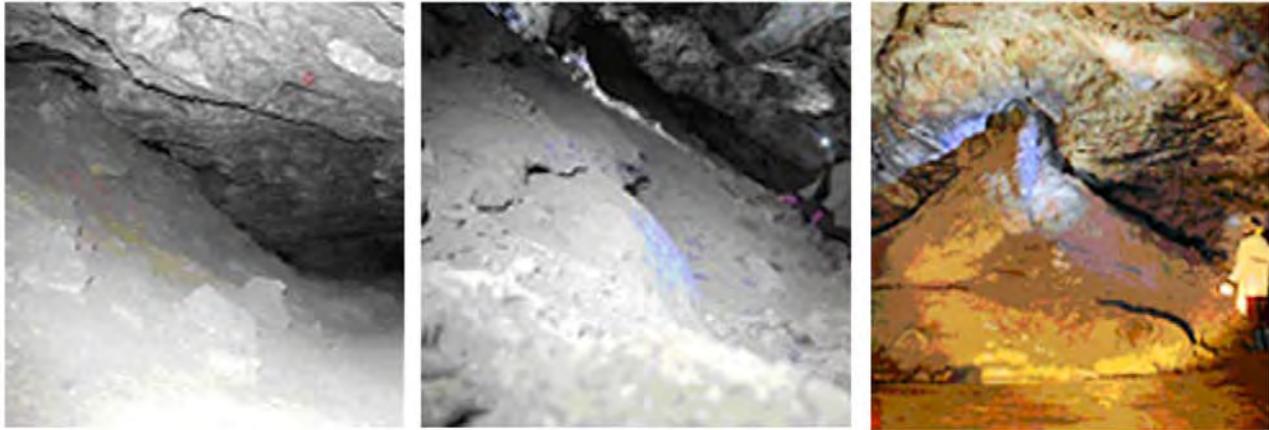


Рис. 1. Общий вид осыпей под органическими трубами из различных микроклиматических зон (слева – в зоне постоянных отрицательных температур, в центре – в переходной зоне, справа – в нейтральной зоне с практически постоянной положительной температурой).



Рис. 2. Расположение отобранных проб в микроклиматических зонах в Кунгурской Ледяной пещере: 1 – зона постоянных отрицательных температур; 2 – переходная зона; 3 – нейтральная зона с практически постоянными температурами; 4 – граница распространения многолетнего оледенения; 5 – места отбора проб.

режимами: постоянно отрицательным (холодная зона), постоянно положительным (теплая зона) и изменчивым (переходная зона).

В холодный период воздух пещеры на входе находится в восходящем движении, в теплый – в нисходящем. Восходящая (зимняя) циркуляция возникает осенью при температуре несколько ниже +5 °С, а нисходящая (летняя) – несколько выше +5 °С.

В зоне отрицательной температурной аномалии (холодной зоне) в течение всего года сохраняются отрицательные температуры, что благоприятно для образования многолетнего льда. Граница постоянного оледенения в пещере проходит вдоль северной части Крестового и восточной части Западного грота (около 200 м от входа), а граница сезонного оледенения – по гротам Морское Дно, Геологов и Смелых (рис. 2).

В переходной зоне самый теплый период (с температурами выше нуля до 3°С) начинается в апреле и продолжается, в зависимости от смены положительных температур на поверхности, до октября-ноября. Зимой (декабрь-март) в этой зоне (в гротах Вышка, Руины, Морское Дно, Смелых и Грозный) образуется сезонный лед. В переходной зоне также находятся граничные части многолетнего льда в гротах Скандинавский и Полярный. Теплый период здесь намного короче, всего два-три месяца (сентябрь-ноябрь).

В нейтральной зоне с практически постоянными температурами около 5-6 градусов находится Заповедная часть пещеры и гроты Дружбы Народов, Романтиков, Длинный, Колизей и др. (рис. 2).

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Аккумуляционные конуса под устьями органических труб имеют следующий состав: продукты разрушения карстового массива (обломки сульфатных и карбонатных пород, глина) и материал из перекрывающих Ледяную гору плиоцен-четвертичных осадков (глины, суглинки, щебень, галька и пр.). Были выбраны три осыпи (рис. 2) под органическими трубами: первая – в проходе Полярный-Данте (холодная зона), вторая – в проходе Крестовый-Руины (переходная зона) и третья – в гроте Эфирный (теплая зона).

Отбор проб объемом 8 литров производился в июле 2009 г. с поверхности осыпи. Общая характеристика проб приведена в таблице 1.

**Таблица 1.**

Общая характеристика проб отложения провально-осыпных конусов под органическими трубами

№	Климатическая зона	Местоположение	Вес, кг	Влажность	Особенности
1	Холодная (постоянных отрицательных температур)	проход Полярный – Данте	7	сухая	материал с органическим веществом, рассыпчатый, легкий
2	Переходная (зимой отрицательные температуры, летом положительные)	проход Крестовый – Руины	14	водонасыщенная	тяжелая
3	Теплая (температура в пещере и карстовом массиве одинакова)	грот Эфирный	9	водонасыщенная	на поверхности осыпи отмечено наличие желобков, по которым стекает вода из органической трубы

Пробы подвергались мокрому севу и были разделены согласно ГОСТу 12536-79 «Грунты» на следующие классы: глинистые частицы (менее 0,1 мм), песок (0,1-1 мм), мелкая дресва (1-5 мм), крупная дресва (5-10 мм), мелкий щебень (5-10 мм), крупный щебень (10-100 мм). Для каждого класса проводились определения литологического состава обломков и их количественного содержания (рис. 3).

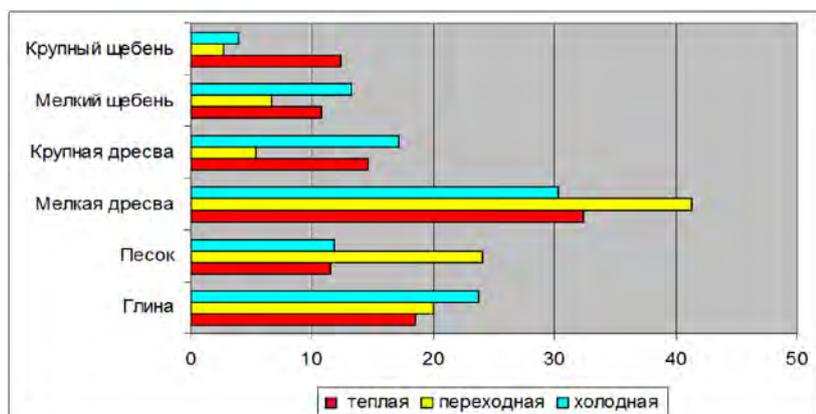


Рис. 3. Распределение обломков по фракциям в осыпях, находящихся в разных микроклиматических зонах.

В связи с инертностью процессов трансформации вещества в холодной зоне, соотношения различных размерных фракций в этих отложениях можно оценивать как исходные или эталонные. В сравнении с ними в переходной зоне происходит увеличение доли мелких классов и уменьшение количества крупных обломков. В теплой же зоне – наоборот. Подобное изменение гранулометрического состава связывается в первом случае с морозным выветриванием (дезинтеграцией), а во втором – с вымыванием стекающей водой.

Изучение литологического состава крупнообломочной (более 1 мм) фракции показало, что осыпи всех микроклиматических зон сложены обломками следующих пород: пелитоморфный

доломит, оолитовый известковистый доломит (в различной степени кальцитизированный и перекристаллизованный), брекчия кальцитового состава и гипс (рис. 4). Доломитовые породы происходят из неволинской пачки, а брекчия является продуктом переотложения карбонатного материала в промежуточных полостях карстующегося массива. Гипс зафиксирован только в холодной и переходной зонах и мог попадать в осыпи из шалашинской, неволинской и ледянопещерской пачек.

Отсутствие сульфатных пород в теплой зоне и пониженное в переходной отражают активность процессов растворения в самой осыпи. Незакономерное изменение количества карбонатных пород (брекчии и доломитов) может отражать различную гипергенную трансформацию пород в верхней части карстового массива.

Количественный минералогический анализ песчаной фракции осыпей показал постоянное присутствие незначительного

Таблица 2

Встречаемость и морфологическая характеристика минералов и агрегатов в песчаной фракции

Минералы, агрегаты, обломки пород и формы их выделения		Микроклиматические зоны		
		Теплая (грот Эфирный)	Переходная (переход между гротами Крестовый и Руины)	Холодная (переход между гротами Полярный и Данте)
Гипс	Обломки алебаstra ледянопещерской пачки		+	+
	Регенерированный алебастр		+	+
	Кристаллы гипса		+	+
	Сростки и сложные агрегаты, в том числе расщепленные		+	+
	Конкреции ("ежи")		+	
	Кристаллические корочки		+	
	Селенит		+	
	"розы"	+		
Целестин	Кристаллы, часто корродированные		+	
Карбонатные оолиты неволинской пачки	Пелитоморфные кальцит- доломитовые	+	+	+
	С выщелоченным ядром	+	+	+
	С друзовидным кальцитовым ядром		+	+
	Перекристаллизованные кальцитизированные	+	+	+
	Регенерированные	+	+	+
	Родохрозитовые	+	+	+
	Сидеритовые			
Кальцит	Кремевый матовый	+++	+	+++
	Желтоватый и бесцветный	++	++	++
	Бесцветный остроромбоздрический	+	+	+
	Призматический с расщепленной вершиной			+
	Шестоватые прожилки			+
	Сростки, корочки			+
Обломки аргиллита	Неизмененный	+		+
	Выщелоченный	+		+
	Ожелезненный	+	+	+
Гидроксиды марганца	Примазки, почки, сплошные агрегаты	+	+	+

количества (менее 2%) кварца, кремня, аргиллита, гидроксидов железа. Преобладающими являются обломки кальцитовых брекчий, доломитовых оолитов (рис. 5). Сульфаты представлены двумя разновидностями. Это обломки мелкозернистого гипса (алебастр) и идиоморфные кристаллы.

Отсутствие пелитоморфного доломита может говорить о его переходе в пелитовую (глинистую) фракцию минуя песчаную в процессе выветривания. Присутствие кристаллов гипса в переходной зоне может говорить о том, что в процессе растворения обломочного алебаstra образуются крупные новообразованные индивиды гипса.

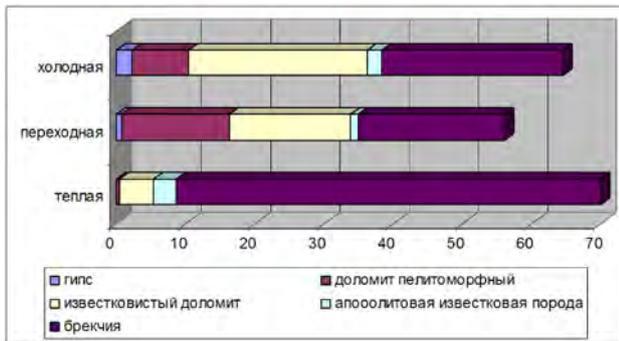


Рис. 4. Литологический состав крупнообломочной фракции в осыпях разных микроклиматических зон (разница от 100 % приходится на мелкообломочную фракцию)

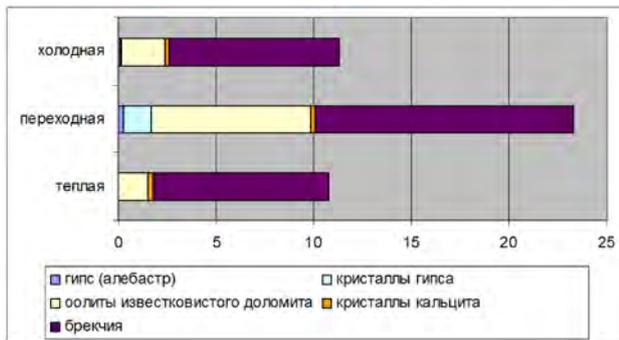


Рис. 5. Литолого-минералогический состав мелкообломочной (песчаной) фракции

Онтогеническое изучение показало большое разнообразие выделений минеральных индивидов и агрегатов (таблица 2), образование которых связывается как с процессами, происходящими в карстующемся массиве, так и самой осыпи.

### МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ, СФОРМИРОВАВШИЕСЯ В КАРСТУЮЩЕМСЯ МАССИВЕ

К ассоциации минералов, сформировавшимся в карстовом массиве, отнесены обломки агрегатов, связанные с изменением карбонатных пород неволинской пачки. Они отмечены в осыпях всех климатических зон. Исходным субстратом являлся оолитовый и пелитоморфный доломит.

Наличие переходных разностей между неизменными и вторичными породами позволяет предполагать, что в процессе инфильтрации вадозных вод происходило постепенное выщелачивание магниевой (доломитовой) составляющей с образованием ажурных крустификационных агрегатов с полым ядром на месте оолитовых субиндивидов или обломков пелитоморфного агрегата.

Полный восстанавливаемый ряд выглядит следующим образом:

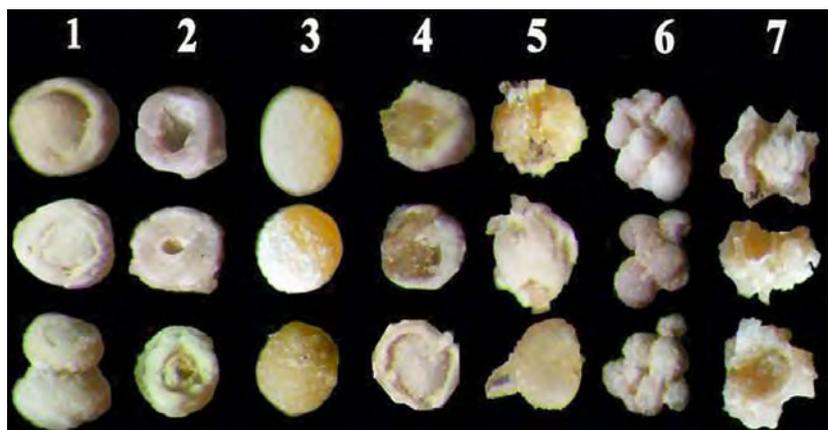


Рис. 6. Ряд последовательной трансформации оолитов (размер от 0,1 до 1 мм): 1 – исходные оолиты известкового доломита; 2 – оолиты с выщелоченным ядром; 3 – полупрозрачные перекристаллизованные оолиты кальцитового состава; 4 – с друзовидно-секреционным ядром; 5 – оолиты обросшие кристаллами кальцита; 6 – агрегаты с новообразованным кальцитовым цементом; 7 – фрагменты кавернозного апооолитового агрегата кальцитового состава.

пелитоморфный оолитовый известковый доломит → оолиты с выщелоченным ядром → оолиты с друзовидно-секреционным кальцитовым ядром → кавернозно-друзовидный кальцитовый агрегат (рис. 6).

Наряду с кавернозно-друзовидными кальцитовыми агрегатами в массиве сформировались кальцитовые брекчии. В качестве обломков зафиксированы пелитоморфный доломит и аргиллит (рис. 7). В некоторых брекчиях обломки пород полностью выщелочены, что может говорить об их длительном нахождении в зоне инфильтрации. Наличие на обломках брекчий с кальцитовым цементом следов механического износа (окавывания) отражает длительный путь из массива в пещеру путем многократного обрушения (рис. 8).

Присутствие псевдоморфоз марганцевого кальцита, родохрозита и сидерита по оолитовым субиндивидам позволяет предположить, что в процессе общего выщелачивания карбонатных пород происходило локальное пересыщение растворов и проявление ионного замещения по схеме: кальцит  $\text{CaCO}_3 \rightarrow$  марганцевый кальцит  $(\text{Ca, Mn})\text{CO}_3 \rightarrow$  кутногорит  $\text{CaMn}(\text{CO}_3)_2 \rightarrow$  родохрозит  $\text{MnCO}_3$ , а также кальцит  $\text{CaCO}_3 \rightarrow$  сидерит  $\text{FeCO}_3$  (рис. 9). В процессе дальнейшего преобразования, происшедшего в присутствии кислорода, соединения железа и марганца трансформируются в сульфаты (ярозит) и гидроксиды.

Присутствие свободного кислорода приводит к окислению соединений железа и марганца и формированию почковидных и землистых выделений гидроксидов (рис. 10). Отмечено, что в процессе окисления железа слоистые силикаты, слагающие аргиллит постепенно преобразуются в глинисто-охристые образования (рис. 11).

Таким образом, насыщенные сульфат-ионом инфильтрационные воды приводят не только к выщелачиванию карбонатных пачек, но и трансформации их минеральной (дедоломитизация) состава и структурно-текстурных особенностей. Тем самым происходит увеличение порового пространства

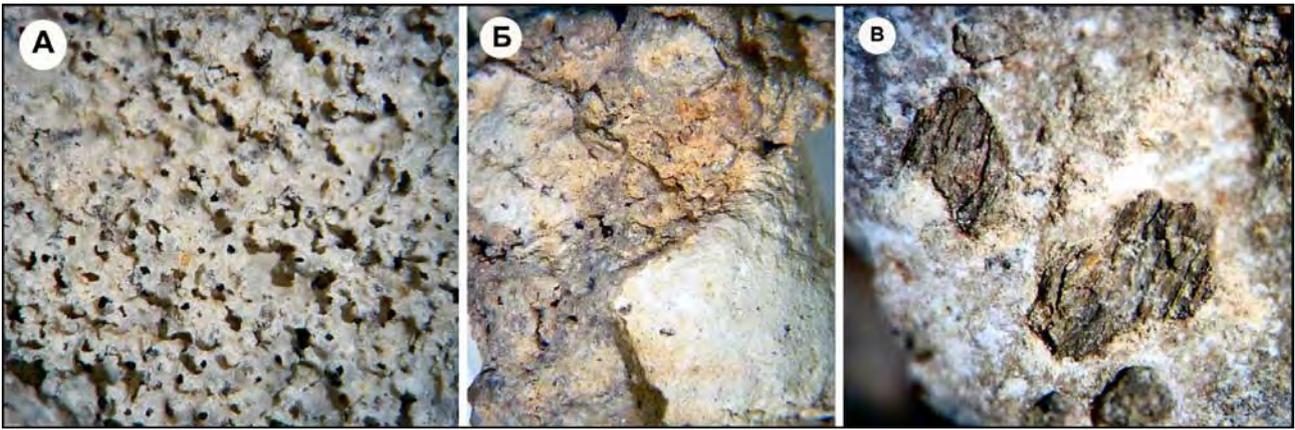


Рис. 7. Обломки кальцитовых агрегатов (размер от 1 до 10 см), сформировавшихся в карстующемся массиве: А – кавернозный апоолитовый агрегат; Б, В – брекчии с обломками пелитоморфного доломита и аргиллита.

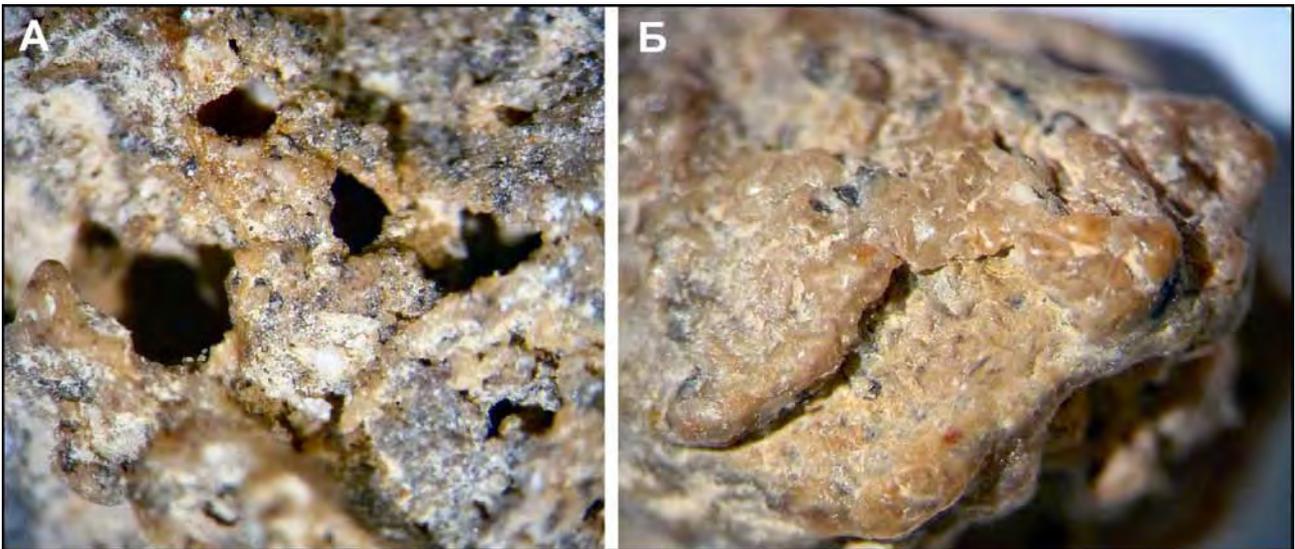
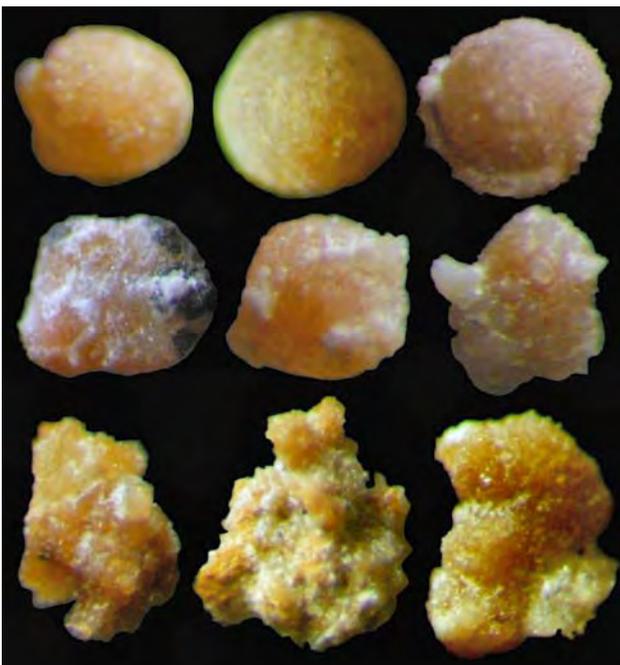


Рис. 8. Брекчии (размер от 1 до 10 см) с выщелоченными обломками и следами механической транспортировки.



и подготовка массива к формированию карстовых пустот, особенно органичных труб.

**МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ,  
СФОРМИРОВАВШИЕСЯ В ОСЫПЯХ РАЗЛИЧНЫХ  
МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОН ПЕЩЕРЫ**

Выше было показано, что основной материал осыпей преимущественно сложен карбонатным материалом, и только в переходной и холодной зонах сохранились обломки сульфатов. Минералогический анализ материала из теплой зоны позволил зафиксировать, что сульфаты представлены единичными сростками тонкопластинчатых кристаллов, называемых гипсовыми розами (рис. 12). Их ажурное строение и хрупкость позволяют полагать, что они сформировались в самой осыпи, вероятно, за счет ранее растворенных обломков алебаstra.

В осыпи из холодной зоны гипс представлен в основном неправильными обломками алебаstra,

Рис. 9 (слева). Доломитовые оолиты (размер от 0,1 до 1 мм), замещенные родохрозитом (верхний и средний ряд) и обросшие сидеритом.



Рис. 10. Примазки и почковидные агрегаты гидроксидов марганца на обломках пород (размер от 0,1 до 1 мм) различного состава.



Рис. 11. Ряд последовательного изменения и ожелезнения обломка аргиллита (размер от 0,1 до 1 мм).

составляющими 2,3 об. %. Наряду с ними присутствуют мелкие (от 0,1 до 0,5 мм) индивиды и агрегаты, отнесенные к криогенным образованиям, описанным ранее в работах Андрейчука и др. (1989, 2001), Чайковского, Кадебской (2009). Они представлены расщепленными индивидами, скелетными и плоскогранными кристаллами, сростками типа «ласточкина хвоста» (рис. 13). Зафиксированы сложные агрегаты, различные зоны которого отражают смену быстрого дефектного роста, характеризующиеся мутно-белой окраской, плоскогранной бесцветно-прозрачной. Подобная смена предполагает кратковременные эпизоды потепления.

В переходной зоне наряду с неизменными обломками зернистого гипса (алебаstra) зафиксированы в различной степени перекристаллизованные агрегаты: от среднезернистых до покрытых друзовидной коркой – конкрециевидных (рис. 14). Зафиксированы также тонкие листоватые расщепленные и скелетные кристаллы, связываемые с криогенезом, а также многочисленные плоскогранные кристаллы различного габитуса, формирующиеся при положительной температуре (рис. 15). Все эти индивиды не несут следов механического износа, что отражает их образование в самой осыпи. Реже фиксируются призматические кристаллы целестина с неровной корродированной поверхностью.

Таким образом, в теплой зоне, где происходило активное растворение сульфатного материала, новообразование гипса практически не происходит. В холодной зоне обломков гипса много, в связи с подавленностью процессов растворения. Аутигенные формы представлены лишь незначительным количеством мелких криогенных образований, которые могут быть связаны с испарением льда. В переходной

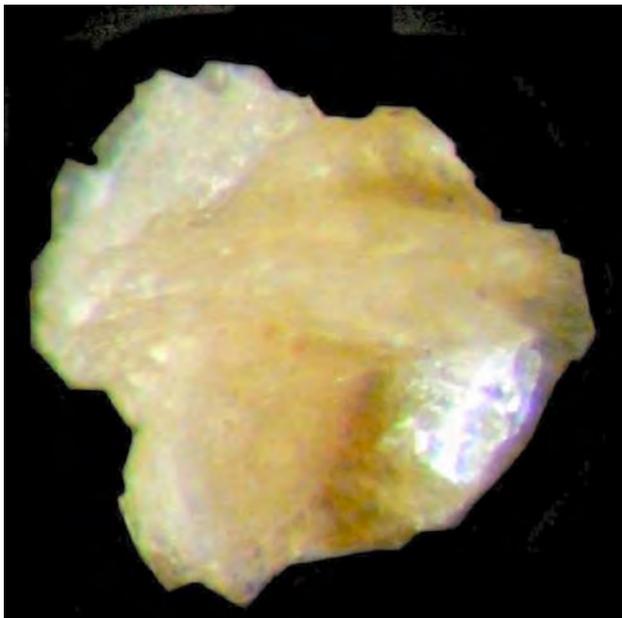


Рис. 12. Гипсовая роза (размер 0,7 мм) из теплой зоны (грот Эфирный).

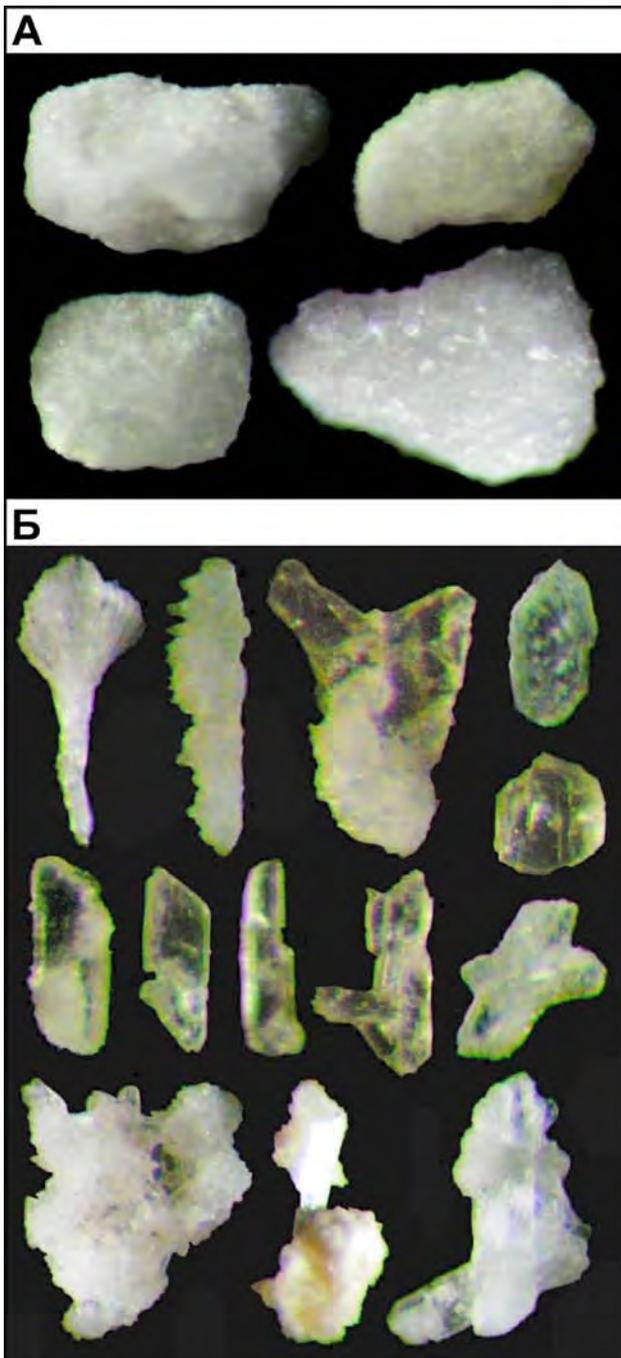


Рис. 13. Обломки алебастра (размер от 0,1 до 1 мм) и криогенные гипсовые образования (размер от 0,1 до 0,5 мм) из осыпи холодной зоны.

зоне исходные обломки алебастра сохранились лишь в незначительном количестве. В большинстве случаев они перекристаллизованы. Наряду с криогенными выделениями присутствуют различные морфологические типы гипса, что свидетельствует о значительных колебаниях температуры и, вероятно, степени насыщения растворов.

Изучение выделений кальцита показало в целом близкий набор морфологических типов кристаллов. Во всех пробах зафиксированы три типа ромбоэдрических кристаллов: относительно изометричные непрозрачные кремовые, более острые бесцветно-желтоватые и

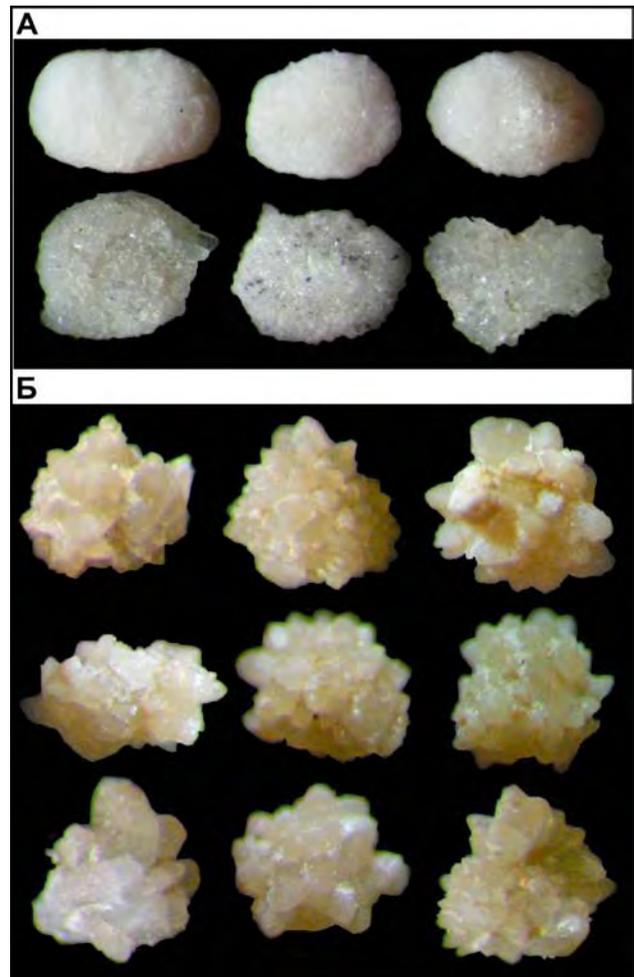


Рис. 14. Обломки гипса (размер от 0,1 до 1 мм) и продукты их частичной и полной перекристаллизации из осыпи переходной зоны.

острые бесцветные. В холодной зоне количество новообразованного кальцита минимально, а также присутствуют единичные индивиды с расщепленной (занозистой) поверхностью (рис. 16). В теплой зоне кроме отдельных кристаллов и сростков отмечаются более сложные конкрециевидные агрегаты, а в переходной – литифицированные участки осыпи (брекчии), сцементированные кальцитовым цементом (рис. 17).

Таким образом, климат пещеры не сильно влияет на разнообразие морфологических типов кальцита и сказывается главным образом на интенсивности минералообразования. В холодной зоне эти процессы замедлены, а в переходной зоне они не только вызывают появление единичных кристаллов, но и брекчий, что переводит их в разряд породообразующих.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение вещественного состава провальнo-осыпных отложений под органическими трубами, вскрывающими практически весь разрез карстующейся толщи над Кунгурской Ледяной пещерой, позволило установить два крупных этапа их преобразования.

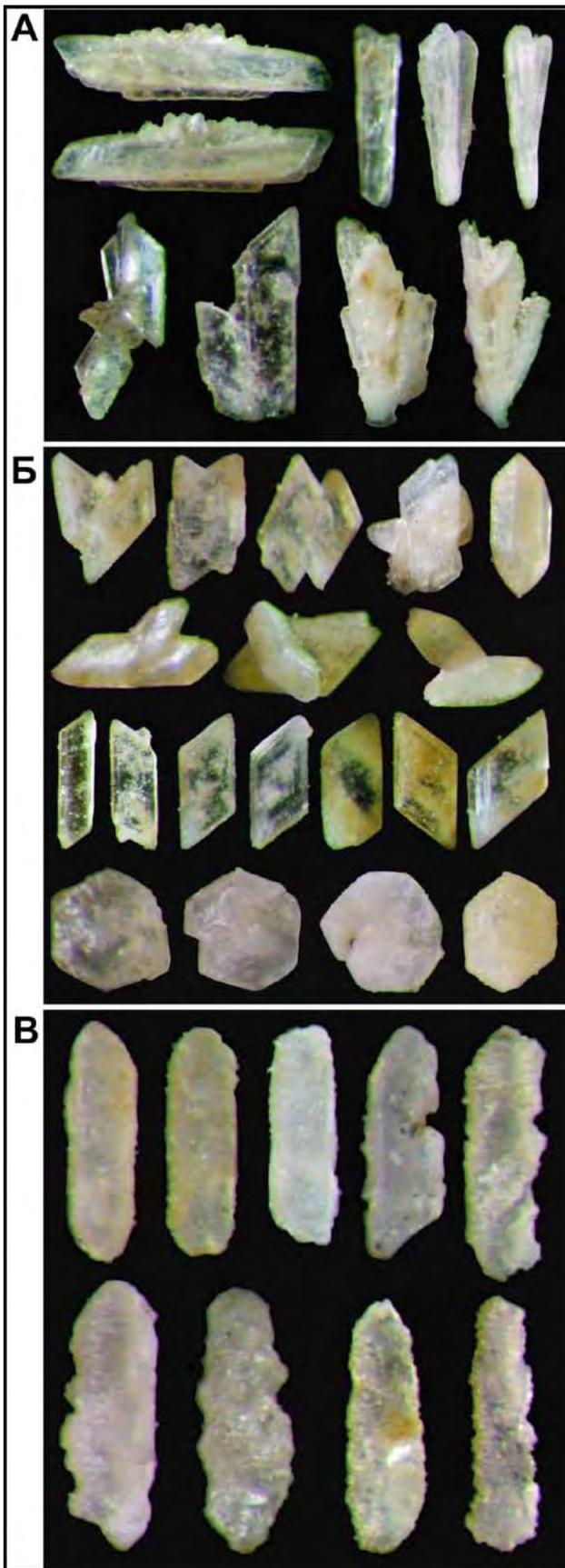


Рис. 15. Новообразованный гипс (криогенный и обычный, размер от 0,1 до 1 мм) и целестин из осыпи переходной зоны.

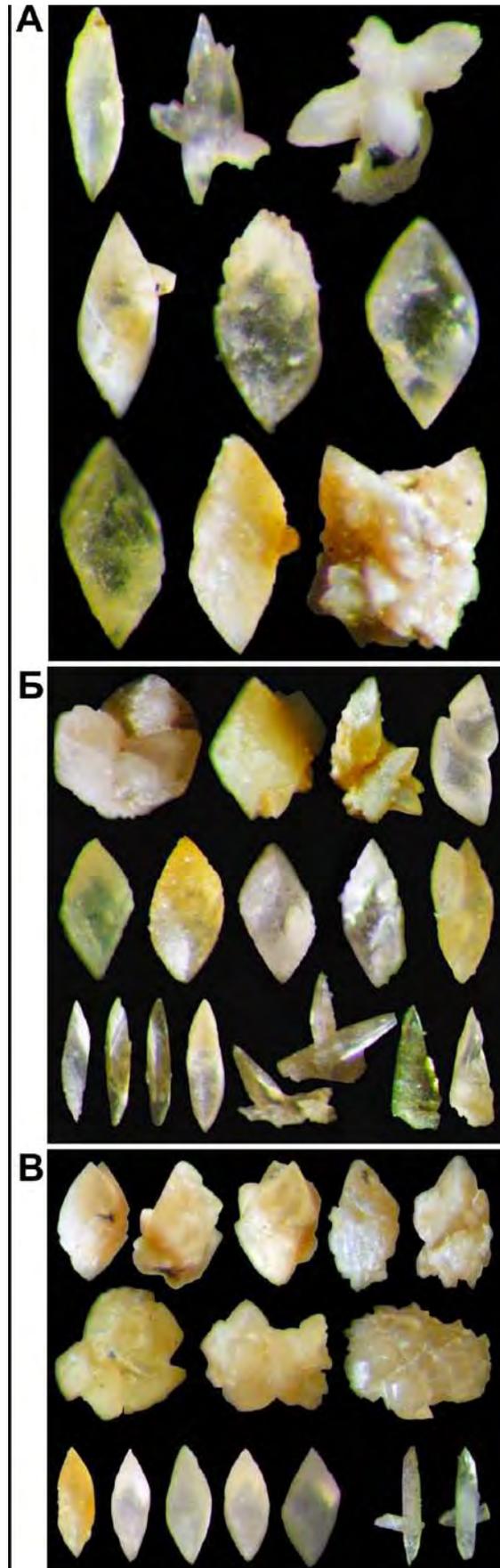


Рис. 16. Морфология кальцита (размер от 0,1 до 1 мм) из холодной, переходной и теплой зон.

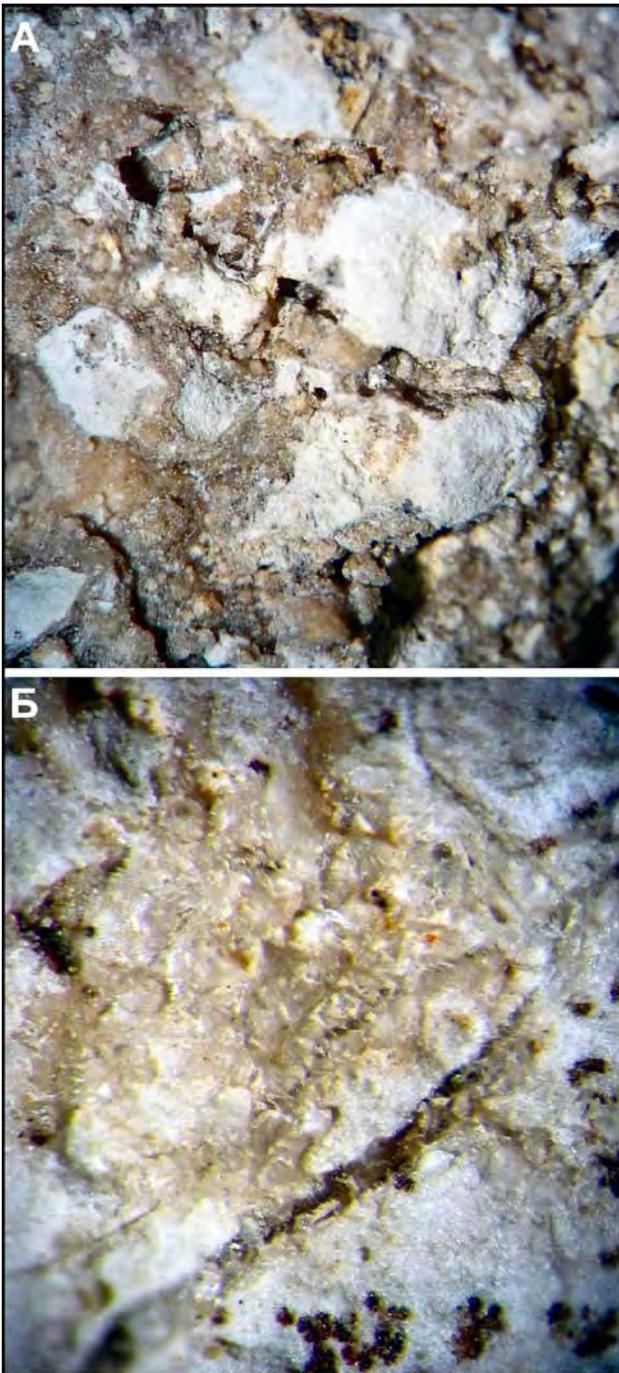


Рис.17. Общий вид и детали строения новообразованной брекчии (размер обломков от 1 до 5 см) сцементированной и обросшей кристаллами кальцита из переходной зоны.

Первый этап происходил в карстовом массиве, задолго до образования пещеры. Процессы трансформации были приурочены к прослоям доломитовых пород локализованных в гипс-ангидритовой толще. Они подверглись избирательному выщелачиванию и перекристаллизации, которые сопровождалась ионно-обменными реакциями (дедоломитизация, родохрозитизация, сидеритизация). При этом сформировались высокопористые апооолитовые кальцититы и брекчии на кальцитовом цементе. Предполагается, что эти процессы

предшествуют и подготавливают карстовый массив к формированию пустот, и в частности органических труб.

После обрушения дезинтегрированного материала в Кунгурскую пещеру происходила его дальнейшая трансформация в различных микроклиматических обстановках. В холодной зоне преобразование карбонатного и сульфатного материала замедлено. Количество обломков алебаstra максимально, а новообразованный гипс представлен криогенными выделениями, формирующимися при замерзании сульфатно-кальциевых вод. В теплой зоне обломочный сульфатный материал растворен полностью, а аутигенные минералы представлены единичными гипсовыми розами. В переходной зоне часть растворенного кластогенного гипса идет на формирование как криогенных, так и многообразных габитусных и агрегатных форм, связываемых с положительными температурами.

Морфология новообразованных карбонатов различных зон близка, однако интенсивность минералообразования максимальна в переходной зоне, где эти процессы становятся породообразующими и приводят к формированию брекчий.

Наиболее активный характер пещерного минералообразования характерен для переходной зоны, отличающейся значительными перепадами температур, резкими колебаниями насыщенности растворов и образованием так называемой гипсовой муки, выступающей в качестве промежуточного продукта для формирования крупных кристаллов, образующихся как при положительных, так и отрицательных температурах.

Выявленные признаки могут быть использованы в качестве маркеров для идентификации палеоклиматических обстановок, происходивших в карстовых полостях карбонатно-сульфатных массивов.

Авторы благодарны Е.П. Чирковой за помощь в обработке материалов.

## ЛИТЕРАТУРА

- Андрейчук В.Н. Проблемные вопросы классификации пещерных отложений // Минералы и отложения пещер и их практическое значение. - Пермь. 1989. - С. 4-6.
- Андрейчук В., Галускин Е. Криогенные минеральные образования Кунгурской ледяной пещеры // Пещеры. // Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2001. - С. 118-115.
- ГОСТ 12536-79 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.
- Лукин В.С. Условия и этапы формирования Кунгурской пещеры // Карст Урала и Приуралья. Мат-лы Всеурал. совещ. - Пермь, 1968. - С. 39-42.
- Чайковский И.И., Кадебская О.И. Криогенный гипс Кунгурской Ледяной пещеры // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского: сб. науч. ст.– Пермь: Перм. ун-т, 2009. – вып. 12. – С. 85-90.