

ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ, ЛАНДШАФТОВЕДЕНИЕ И ГЕОМОРФОЛОГИЯ

УДК 556.383

О.И. Кадебская**ПРОЦЕССЫ СОВРЕМЕННОГО МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ В КАРБОНАТНЫХ ПЕЩЕРАХ УРАЛА, СВЯЗАННЫЕ С РАЗЛИЧНЫМИ МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИМИ ОБСТАНОВКАМИ**

При помощи комплекса изотопно-геохимических, минералогических и геоморфологических методов проведено выявление условий образования современных карбонатных минералов. На основании изучения и обобщения данных по современным микроклиматическим обстановкам внутри пещер установлено, что минералообразование не только четко привязано к этим обстановкам, но и обусловлено ими. Микроклимат карстовой полости определяет активность процессов минералообразования, проявленных в морфологическом разнообразии, а также в вариациях химического и изотопного состава С и О карбонатов. В холодной (отрицательной температурной аномалии) и переходной зонах были выделены четыре типа формирования криогенной минерализации. Ранее выявленные зависимости криогенного минералообразования в пещерах Европы подтвердились в пещерах Урала. В процессе исследования были установлены два новых тренда фракционирования. Первый связан с медленной кристаллизацией из растворов, пересыщенных в процессе частичного вымораживания, второй – с перекристаллизацией тонкодисперсного криогенного материала в пленке воды на поверхности наледи при положительных температурах. Минералообразование карбонатов в нейтральной зоне происходит в основном при испарении растворов на границах порода-глина, порода-вода и порода-воздух.

К л ю ч е в ы е с л о в а: Урал, пещеры, карстовый ландшафт, карбонаты, микроклимат, геохимические индикаторы, современная минерализация.

О.И. Kadebskaya**PROCESSES OF MODERN FORMATION OF NEW MINERALS IN DIFFERENT MICROCLIMATIC CONDITIONS OF CARBONATE CAVES OF URALS**

With the help of complex isotope geochemical, mineralogical and geomorphological methods carried out identifying the conditions of formation of modern carbonate minerals. The main influencing factor in formation of new minerals is the microclimate of karst cavity. This one is defined by the next features: position under watershed, labyrinth type of the cave and many ways for air to come into the cave system from the outside. The microclimate of the karst cavity determines the activity of mineral processes, the crystallomorphological features, as well as variations in the chemical and isotopic composition of C and O carbonates. The cold (negative temperature anomalies) and the pedestrian zones of formation of four types of cryogenic mineralization were identified. Previously identified mineralization depending cryogenic caves in Europe were confirmed in the caves of the Urals. During the study, two new trend fractionation were installed. The first involves a slow crystallization from solutions supersaturated in the course of partial freezing, is connected with the second fine recrystallization cryogenic material in a film of water on the surface of the ice at above-zero temperatures. Mineral carbonates in the neutral zone occurs mainly by evaporation of solutions on the boundaries of rock-clay, rock-water, rock-air.

К е у о р д с: Ural Mountains, caves, karst landscape, carbonates, climate, geochemical indicators, modern formation.

Относительная изолированность пещер, стабильность температурных условий, а также великолепная сохранность сформировавшихся минеральных образований делает их уникальным объектом для выявления специфики проявления геохимических процессов в условиях современной климатической зональности, а также для реконструкции палеоклиматических условий.

Карст – это геологический или инженерно-геологический процесс и связанные с ним явления, развивающийся в результате взаимодействия воды с растворимыми в данной обстановке горными породами [3]. На интенсивность развития карста оказывают влияние гидрогеологическая ситуация, литологический состав пород и мощность коры выветривания.

В пределах Западно-Уральской складчатой зоны закарстованы карбонатные породы (известняки, доломиты, доломитизированные известняки) от среднего девона до нижней перми. Карстующиеся породы Центрально-Уральского поднятия представлены известняками и доломитами ордовикской, силурийской и частично девонских систем. Карбонатные массивы Урала представляют собой участки голого или перекрытого элювиально-делювиальными отложениями карста. При действии процессов выветривания и коррозии происходит разрушение растворимых горных пород с поверхности. Химический состав изученных карбонатных пород приближен к составу чистых известняков и иногда имеет небольшое количество различных минеральных примесей (доломит, кварц, минералы группы глин, оксиды и гидроксиды железа и марганца, пирит, марказит, гипс, органические вещества).

Обломочные отложения коры выветривания по химическому составу соответствуют коренным породам (известняки, доломиты), в той или иной степени измененными физическим и химическим выветриванием [8].

Геохимические обстановки минералообразования в карстующихся массивах рассмотрены в ряде трудов [18; 19]. Большое количество публикаций посвящено образованию водных хемогенных отложений в карбонатных пещерах. Наиболее известная обобщающая работа впервые была издана в США [20]. Впервые вопросы о влиянии микроклимата на минералообразование в подземных условиях и наличии минералов-индикаторов были затронуты Г.А. Максимовичем [9].

Карстовые отложения, сформированные при растворении, метасоматозе и химическом осаждении Р.А. Цыкиным [13], были систематизированы в группы по генетическому признаку: инфлювий, элювий, аллювий, делювий, пролювий, коллювий и др. Автором был сделан вывод, что абиотические потоки вещества в ландшафте подчинены воздействию силы тяжести и в основном осуществляют внешние связи с поверхностью. Вещество литосферы мигрирует в ландшафте в двух основных формах:

1) в виде геохимически пассивных твердых продуктов денудации – обломочного материала, перемещаемого под действием силы тяжести;

2) в виде водорастворимых веществ, т.е. ионов, подверженных перемещению с водными потоками и участвующих в геохимических и биохимических реакциях.

Согласно современным представлениям геохимические барьеры, являющиеся открытыми и неравновесными динамическими системами [7], возникают на определенных участках земной коры, на которых происходит резкое уменьшение интенсивности миграции химических элементов за счет смены условий и, как следствие, их концентрации [1]. На скорость изменения условий, прежде всего, влияет окружающая среда (микроклимат территории, а в частности, температура и циркуляция воздуха) и наличие водных ресурсов (движущей силы). Геохимический состав воды зависит от температурного режима и особенностей растворяющихся пород, с которыми взаимодействуют потоки.

Вода внутри карстовых полостей может быть в газообразном, жидком и твердом состояниях. Химизм воды зависит от источника поступления. Поверхностные воды относятся к окислительному ряду, так как за счет инфильтрации атмосферных осадков содержат растворенный кислород. Гидрокарбонатно-кальциевые воды, формирующиеся в карбонатных массивах, благоприятны для миграции CaCO_3 , U, Mo и F. Сульфатные и хлоридно-сульфатные воды, формирующиеся в районах карбонатно-сульфатного, сульфатного и соляного карста, интенсивно выносят Cl, S в форме SO_4^{2-} , Na, B, Sr. При взаимодействии сульфатных вод с доломитовыми породами происходит раздоломичивание, вынос пелитового материала и образование вторичного кальцита, а воды, в свою очередь, обогащаются сульфатом магния [11].

Таким образом, индикация геохимических процессов в карстовых ландшафтах может быть проведена по параметрам условий современного минералообразования, составу основных продуктов вторичного минералообразования и палеогеохимическим построениям.

Материалы и методы исследований

В зависимости от природных особенностей исследуемой территории использовались методы сбора, анализа и обобщения данных, режимные наблюдения за микроклиматическими параметрами

(температура, влажность, давление), а также за уровнем и химическим составом подземных вод. Основные пещеры, рассмотренные в ходе проведенных исследований, имели похожие микроклиматические характеристики и одинаковый состав пород с абсолютными отметками (для исключения влияния высотной поясности) в пределах 120–335 м.

Для исследования минералообразования в пещерах были отобраны новообразованные карбонаты в различных микроклиматических зонах. При изучении образцов пещерных отложений были применены методы изучения минерального и химического составов: изотопии, термического анализа, сканирующей и рентгеноспектральной микроскопии, термоионизационной масс-спектрометрии.

Химические анализы воды и льда были выполнены в лаборатории геоэкологии горнодобывающих регионов ГИ УрО РАН (аналитики Т.А. Одинцова, Н.В. Быкова) и в лаборатории геологии техногенных процессов ЕНИ ПГНИУ (аналитик И.В. Гущина).

В лабораторных условиях были проведены структурно-морфологические и изотопно-химические исследования. Исследование морфологии и химического состава проводилось на сканирующем электронном микроскопе VEGA 3 LMN с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350/X-max 20 в Горном институте УрО РАН (аналитики Е.П. Чиркова, О.В. Коротченкова).

Изотопные анализы углерода и кислорода 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) и в лаборатории Чешской Геологической службы в Праге на масс-спектрометре MAT Finnigan 251 (аналитик Ф. Бузек). Рабочий стандарт CO₂ получен из каррарского мрамора; результаты с общей аналитической погрешностью $\pm 0,1$ ‰ для $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ приведены к VPDB стандарту.

С 2014 г. анализ стабильных изотопов выполнялся группой Innsbruck Quaternary Group (quaternary.uibk.ac.at) при Инсбрукском университете (руководитель – академик Австрийской академии наук, профессор Кристоф Шпётль) на масс-спектрометре Delta PLUS XL (Fisher Scientific), оснащённом автоматической линией для анализа карбонатов на основе интерфейса GASBENCH (Fisher Scientific).

$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -датировки были выполнены методом масс-спектрометрии с термической ионизацией (TIMS). Изотопы U-серии были измерены масс-спектрометром MAT 262 RPQ TIMS в Гейдельбергском центре Академии наук Германии (руководитель А. Манджини) и в университете г. Шьян (руководитель Х. Ченг, Китай). Все коэффициенты активности были вычислены при помощи постоянных радиоактивного распада по Х. Ченг и др. (Cheng et al, 2000) и скорректированы по детритовому Th, предполагая, что кларковое соотношение $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$, равное 3,8 для детритового материала, и ^{234}U и ^{238}U находятся в вековом равновесии. Абсолютные даты указаны в тыс. лет назад от наших дней (т.е. от 1950 г.).

Результаты и их обсуждение

Минералообразование в зоне отрицательной температурной аномалии. Для характеристики криогенных минералов карбонатных пещер Урала были выбраны пещеры с наибольшим многолетним оледенением на территории Северного – пещеры Медео и Еранка (Пермский край), Среднего – пещеры Марининская, Усьвинская Ледяная (Пермский край) и Южного Урала – пещеры Аскинская и Киндерлинская (Башкортостан). Минералы отбирались с поверхности многолетних наледей из ледяного массива, из стенок и днища пещеры до глубины 1 м (отбор проб производился при помощи ледобура). Наблюдения за поверхностью льда показали, что для наледей характерно неоднородное строение. В краевых частях наледей во многих пещерах, где мощность льда по георадарным исследованиям составляет менее 1 м, лед перекристаллизован в полигональный агрегат, иногда размер индивидов льда достигает 10–15 см. Все захваченные минеральные примеси локализованы вдоль границ зерен и внутри пойкилитовых кристаллов льда в виде ориентированных вrostков. Остальная, более глубокая (до 3,5 м), часть сложена мутным значительно более мелкозернистым льдом.

Анализ морфологии более 2000 тонкодисперсных частиц с поверхности наледей и из ледяных массивов показал, что они представлены кристаллами кальцита и икаитом. В карбонатных пещерах криогенная мука состоит, главным образом, из кристаллов икаита и кальцита 99,5%, кристаллы гипса встречаются редко. Морфология кристаллов зависит от насыщенности растворов и скорости заморзания.

Основной фазой мучнистого материала на поверхности наледей в пещерах Северного Урала являются икаитовые агрегаты, сложенные пластинчатыми, реже дипирамидальными субиндивидами

длиной 30-150 мкм (рис. 1). Они имеют каркасную структуру и состоят из микролитов размером 2-5 мкм. В строении отдельных апоикаитовых субиндивидов зафиксированы элементы футляровидного, решетчатого или хаотичного распределения микролитов.

Пластинчатая и дипирамидальная формы, карбонатно-кальциевый состав и каркасно-микролитовое строение кристаллов позволяют считать их кристаллами икаита, которые претерпели обезвоживание, т.е. они являются параморфозами кальцита по икаиту.

Среди микролитовых агрегатов зафиксированы единичные глобулы гипса. Реже отмечаются войлокоподобные агрегаты, состоящие из «волокон» сечением менее 0,1 мкм, в которых отмечаются обособления сферолитов и кристаллов кальцита гантелевидной формы с расщепленными вершинами. У многих агрегатов наблюдается ровная поверхность, являющаяся, вероятно, основанием. В пробе из ледяного массива новообразования представлены главным образом кальцитом, икаит отмечается в подчиненном количестве. Зафиксировано, что кристаллы (и глобулы) кальцита могут нарастать на различные подложки: костный и растительный детрит, обломки известняка, реликты икаитовых агрегатов и сферолитов.

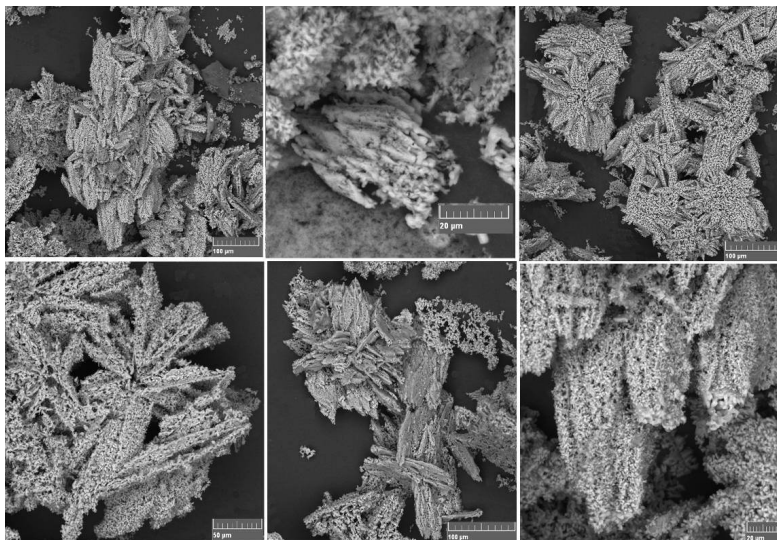


Рис. 1. Каркасно-футляровидные остовы агрегатов икаита

Икаит из наледей представлен расщепленными кристаллами с элементами футляровидного строения, а также нетипичными для кальцита индивидами таблитчатой формы. Внутри наледей встречается кальцит (пещеры Мариинская, Еранка), который нарастает в виде кристаллов треугольного сечения на рыхлые обезвоженные сферолиты икаита.

Отмечены и плотные сферолитовые агрегаты, сложенные, вероятно, полностью кальцитом. Предполагается, что более ранние индивиды икаита могли кристаллизоваться на поверхности льда в процессе его намерзания, а образование кальцита – при перекристаллизации льда. Здесь также присутствует гипс, формирующий сростки уплощенных кристаллов.

Кальцит представлен гладкогранными, скелетными и антискелетными кристаллами острого и тупого ромбоздров кальцита, расщепленными кристаллами, сферолитами, древовидными дендритами, фрагментами почковидных агрегатов – сферолитовыми корками (рис. 2).

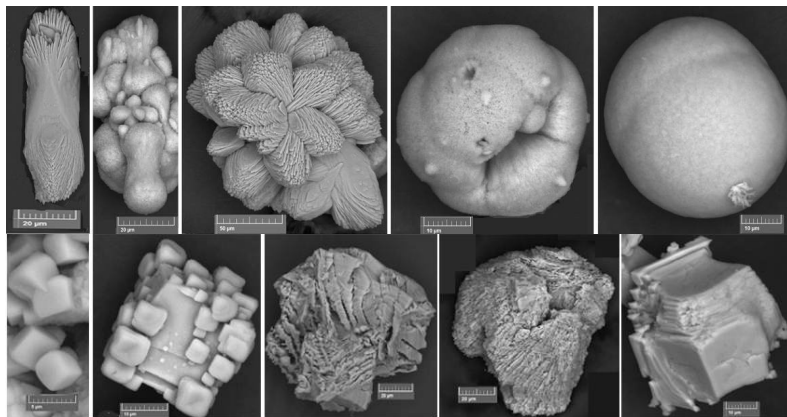


Рис. 2. Морфология кристаллов криогенного кальцита из муки

Размер корок варьируется от 40 до 600 мкм. Анализ морфологии тонкодисперсных частиц кальцита и известные представления о связи формы индивидов с концентрацией растворов [2] позволили ранжировать их в морфологический ряд, отражающий степень пересыщения замерзающей воды. 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. Условия недосыщения обуславливают формирование скелетных кристаллов. Эти ряды отмечены как для кальцита, так и для икаита [6].

Таким образом, при замерзании привнесенных водных растворов на поверхности наледи в карбонатных пещерах происходит отложение карбонатного (и в подчиненном количестве сульфатного) материала в виде тонкодисперсного (менее 150 мкм) материала – криогенной «муки», свидетельствующей о быстрой (шоковой) кристаллизации. Наличие признаков расщепления на микролитах и кристаллах свидетельствует о быстром дефектном росте. Существенное преобладание икаита на поверхности льда в пещерах Северного Урала и преимущественно кальцитового – внутри наледи, а также наличие плоских оснований на их агрегатах позволяет предполагать, что накопившийся на поверхности наледи икаит, высвобожденный при зимнем испарении льда, при взаимодействии с новой порцией поступившей воды обрастает кальцитом. Вероятно, трансформация карбонатного материала может происходить и в процессе перекристаллизации льда. Наблюдаемые взаимоотношения отражают криогенно-диагенетическое изменение («старение») и обезвоживание первичного кристаллоагgregата в процессе накопления ледяной массы.

Характеристика новообразованных карбонатов переходной зоны. На границе холодной и переходной зон в пещере Киндерлинская были найдены и описаны похожие на пещерный жемчуг образования размером до 7 мм, локализованные в краевой части наледи [5]. Изучение морфологии жемчужин показало, что они представляют собой сферолиты, состоящие из плоскогранных индивидов (остро-) ромбоэдрического кальцита (рис. 3).

В центральной части некоторых жемчужин отмечается один, реже – несколько центров кристаллизации, в качестве которых выступают обломочные карбонатные и глинистые частицы. Образование таких агрегатов могло произойти как за счет сферолитового роста расщепившихся зародышей, так и обрастания друзовидной корочкой кристаллов. Предполагается, что криогенная мука смачивается в теплое время года (когда в переходной микроклиматической зоне присутствуют положительные температуры) и перекристаллизуется.

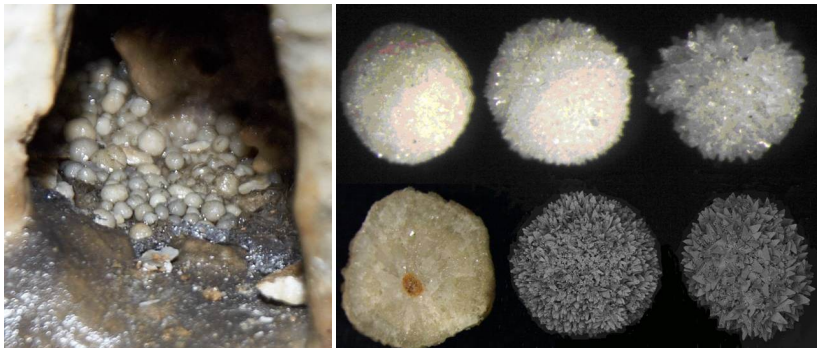


Рис. 3. Пещерный жемчуг: слева – общий вид пещерного жемчуга в нише в п. Киндерлинская; справа – морфология и внутреннее строение жемчужин

В пещере Еранка в переходной зоне нами впервые выделена новая группа минералов, отложение которых происходит из воды, подвергшейся сгущению в процессе частичного вымораживания [14]. При температурах, близких к нулю, образуется более слабominерализованный лед, а пересыщенный раствор стекает дальше, что приводит к осаждению ультрадисперсного волокнистого кальцита в виде «мягких» гур на наклонных поверхностях плоскостного стока и иногда к формированию суспензии тонкоигльчатых кристаллов («лунного» молока) на вертикальных и отрицательных участках стен, а также игольчатого карбонатного «пуха» на глинистом грунте (рис. 4). «Мягкие» гуры представляют собой наиболее экзотическое образование. Они формируются на наклонных стенах частично заполненные водой постройки, которые аналогичны обычным натечным гурам, но по консистенции напоминают промокшую бумагу и легко деформируются руками.

В работе К. Хилл и П. Форти [20] приводится обзор существующих представлений о происхождении «лунного» молока, включающего биогенное и абиогенное происхождение. Для последнего предполагают несколько механизмов: выветривание известняка и отложение из пересыщенных, в том числе замерзающих растворов.



Рис. 4. Тонкодисперсные агрегаты («пух», «молоко», «мягкие» гуры) из пещеры Еранка

Представляется, что ключом к пониманию механизма роста специфических кальцитовых волокон может служить относительно высокая минерализация растворов и резкое их пересыщение на границе с воздухом. Функционирование этих минералообразующих сред, вероятно, поддерживается сезонными колебаниями температуры, обеспечивающими охлаждение стен и конденсацию новых порций влаги для формирования «лунного» молока, а также колебаниями плоскостного стока, определяющего слоистое строение «мягких» гур. Отличие в размерах волокон и степени их обрастания гладкогранными кристаллами обуславливается нами различной степенью испарения и, соответственно, пересыщения. Так, меньшая обводненность «лунного» молока и, соответственно, большая степень пересыщения, по сравнению с «мягкими» гурами, отражается в более крупном размере иголок кальцита и более высокой доле скелетных колосовидных агрегатов. Образование «пуха» происходило на пористой глинистой подложке за счет осмотического подтока растворов по капиллярам.

Характеристика новообразованных карбонатов нейтральной зоны. Во всех исследованных пещерах в нейтральной зоне широко представлены натечные коры, сталактиты, сталагмиты, «лунное» молоко, гуры и кораллиты. Подземные воды инфильтруются через почвенный покров и карбонатный массив, насыщаясь CO_2 . Достигая карстовых полостей, происходит дегазация диоксида углерода, и кальций выпадает в осадок, откладываясь в нейтральной зоне пещер. Для натечных кор и спелеотем характерно наличие как сезонной слоистости, так и радиально-лучистого строения, типичного для таких агрегатов. Чаще всего карбонаты теплой зоны пещер представлены арагонитом и кальцитом, реже доломитом. Отложение кальцита в нейтральной зоне зависит от поступления и стекания инфильтрационных, грунтовых и конденсационных вод. Из медленно каплюющих вод образуются сталагмиты и сталактиты, натеки образуются на наклонных поверхностях (рис. 5). Кораллиты растут в тонкой пленке воды на стенах.

В отличие от переходной зоны, где «лунное» молоко формируется из переохлажденных растворов, в нейтральных зонах пещер для образования молока предложено несколько механизмов. Наряду с биогенным, связанным с жизнедеятельностью микроорганизмов, оно может представлять собой остаточный продукт растворения и дезинтеграции коренной породы, а также осадок из конденсационных растворов [20]. Минеральные образования в озерах представлены кристаллами на дне и стенах, оторочками и минеральными пленками. Формирование кальцитовых пленок на поверхности озер происходит за счет испарения воды и дегазации CO_2 .



Рис. 5. Натечные образования пещер: слева – натечные коры, сталактиты, сталагмиты и сталагматы (колонны) в пещере Геологов-3; справа – гуры и кристаллы кальцита, сформировавшиеся в воде в пещере Грез (фото А. Скрипальщиковой)

Происхождение пещерного жемчуга связано с наличием капели. В мелких водоемах (лужах и др.) на дне находятся песчинки и камешки, которые постоянно вращаются благодаря попадающим на них каплям. С течением времени на «зародышках» появляется кальцитовая пленка, образующая сферолит (рис. 6).



Рис. 6. Образования: слева – пещерный жемчуг, сформированный в мелких проточных ванночках; справа – глинистые отложения в пещере Кутук-2 (Башкортостан)

Из капиллярной воды, поступающей из небольших каналов, образуются экстрезивные формы (например, геликтиты и антолиты). Кристаллографическая ориентировка индивидов в них может быть различна.

Во многих пещерах в нейтральных зонах сформировались мощные слоистые толщи глин, отложенных подземными водотоками.

Несмотря на одинаковый исходный химический состав растворов, формирующихся при инфильтрации через карбонатный массив, для различных климатических зон характерна своя последовательность кристаллизации современных пещерных минералов (рис. 7).

Выявленные морфологические отличия обусловлены различными фациально-климатическими обстановками и минерализацией растворов.

Геохимические отличия новообразованных минералов из разных микроклиматических зон. Для установления отличий в химическом составе минералов из разных зон Киндерлинской пещеры было выполнено 50 анализов. В качестве примеси в кальците установлена примесь магния. Минимальное ее количество (до 1,8 ат. %) зафиксировано в жемчужинах из переходной зоны. Для микрокристаллов из криогенной муки 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 химический состав позволяют предполагать, что жемчужины формировались при положительных температурах в водных пленках, образованных при таянии льда в краевой части наледи.

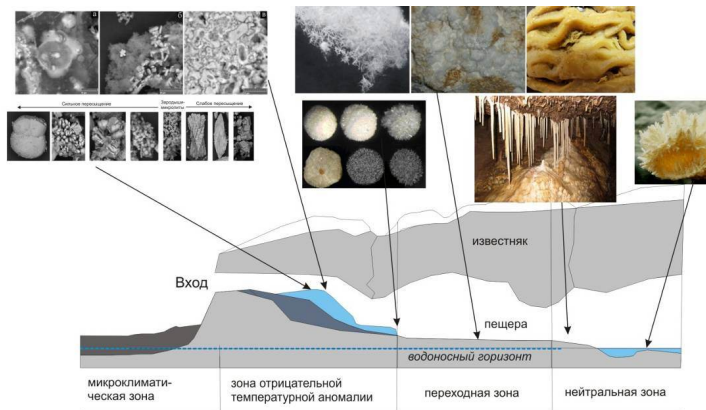


Рис. 7. Морфология новообразованных карбонатов в различных микроклиматических зонах в карбонатных пещерах Урала

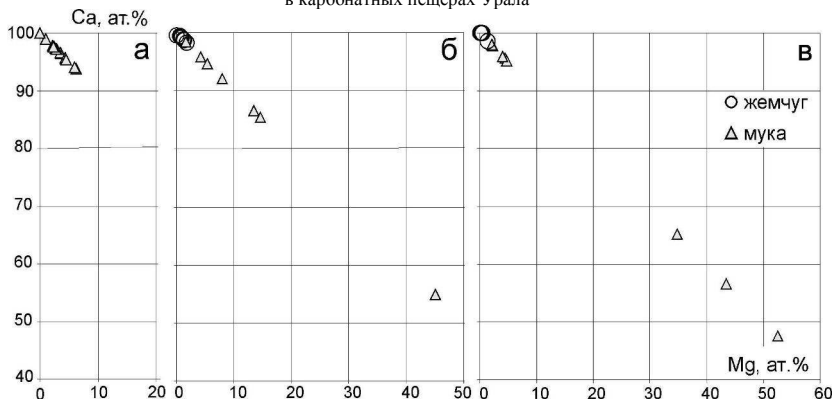


Рис. 8. Соотношение кальция и магния: а – в минеральных фазах из льда; б – с поверхности наледи; в – в нише

Низкомагнезиальные микрокристаллы муки, 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 минерализованным.

Для исследования вариаций химического состава «пуха», «лунного» молока, «мягких гур», криогенной муки и натечных образований из разных климатических зон в пещере Еранка было выполнено около 30 локальных анализов, показавших принадлежность новообразованных минералов к карбонату кальция. В холодной и переходной зонах кальцит имеет примесь магнезия (от 0,1 до 4,0 вес. %) и серы (от 0,1 до 6,7 вес. %).

В пещере Еранка для локализованной во льду карбонатной муки, которая связывается с замораживанием, количество примесей (также, как и в Киндерлинской пещере) минимально (рис. 9), что может говорить об относительно спокойных условиях кристаллизации.

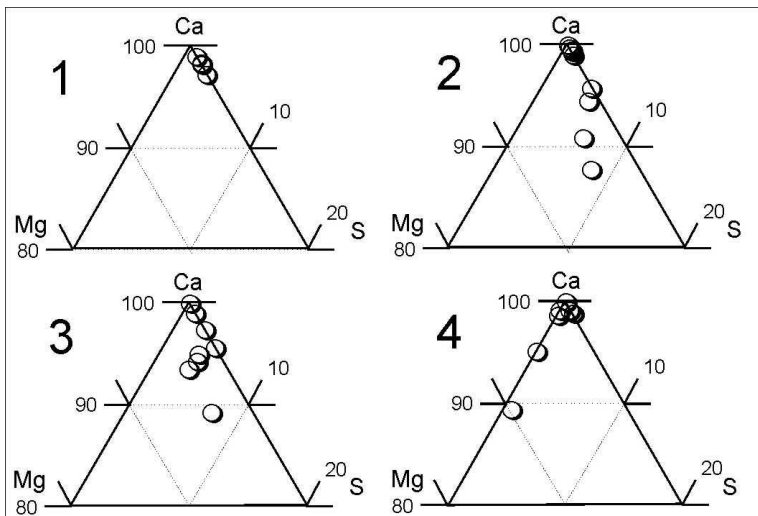


Рис. 9. Сравнительный анализ и вариации Ca–Mg–S (атомн. кол-ва) в карбонатном материале пещеры Еранка: 1 – мука; 2 – «пух»; 3 – «лунное» молоко; 4 – «мягкие» гурлы

Максимальные вариации количества примесей в «пухе» и «лунном» молоке из переходной зоны пещеры Еранка могут отражать существовавшие значительные колебания минерализации, о чем косвенно говорит и присутствие в них гипса. Наличие магнезия в «мягких» гурлах может говорить о проявившейся в них сезонной перекристаллизации.

В натечных образованиях теплой зоны примесей в кальците не зафиксировано.

Изотопный состав исходной породы соответствует составу типичных морских осадочных карбонатов (поле I, рис. 10).

Натечные образования из нейтральных зон пещер Мариинская, Холодная, Еранка, Малая и Махневская (поле III) по изотопному составу соответствуют области распределения обычных спелеотем европейских пещер [17], но облегчены по кислороду [4]. Изотопный состав всех имеющихся минеральных образований озер оказался схожим с составом натечных образований. Вероятно, это обусловлено высокой влажностью пещер и незначительным испарением, что препятствует существенному разделению изотопов.

Четвертый тренд (поле IV) был выявлен для сферолитов (0,5–7 см) и расщепленных кристаллов, которые формировались в межледниковые периоды, когда уровень оттаявшего грунта достигал верхней части пещер [16]. Они характеризуются существенно облегченным составом кислорода, что связывается с медленной совместной кристаллизацией кальцита и льда.

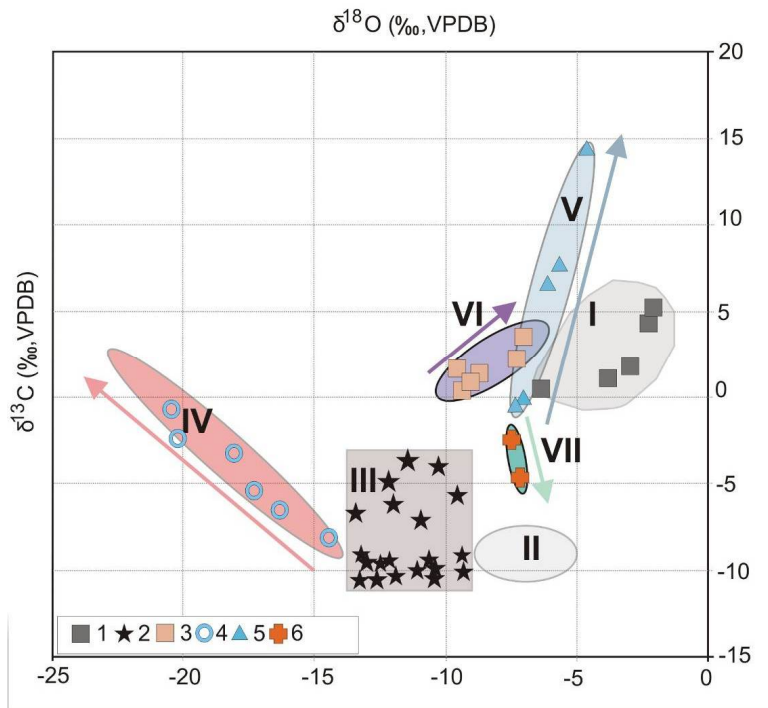


Рис. 10. Изотопный состав первично-осадочных и вторичных карбонатов Уральских пещер: 1 – известняки среднего и нижнего карбона, нижней перми, девона (пещеры Российская, Дивья, Аскинская, Киндерлинская, Еранка); 2 – натечные отложения (коры, сталагмиты и сталактиты) и кристаллы кальцита из пещерных озер; 3 – «лунное» молоко, кальцитовый пух, «мягкие» горы из пещеры Еранка; 4 – кальцит, сформировавшийся при медленном замерзании раствора; 5 – криогенная мука из пещер Урала; 6 – регелогенный «жемчуг» из пещеры Киндерлинская; римскими цифрами показаны поля минеральных образований: I – состав типичных морских осадочных карбонатов [12]; II – волокнистого кальцита из почвы [21]; III – натечных образований, сформировавшихся в теплых (нейтральных) зонах из пещер Урала; IV – тренд, образования криогенных сферолитов и кристаллов из пещер Европы по [16]; V – тренд образования криогенной «муки» при шоковом замерзании в пещерах Европы и Северной Америки по [17]; VI – тренд образования карбоната из растворов при частичном вымерзании в переходной зоне; VII – тренд, связанный с перекристаллизацией криогенной муки во время таяния льда в переходной зоне и образованием «жемчуга»

Авторами было установлено, что эти пещерные образования формировались в теплые периоды межледниковий, когда зона вечной мерзлоты опускалась до кровли подземных полостей, а поступающая вода медленно замерзала внутри подземных полостей. В условиях медленного замерзания льда происходит фиксация в кристаллической структуре льда тяжелого изотопа кислорода ^{18}O . Поэтому при кристаллизации такого кальцита из раствора поступает более легкий изотоп ^{16}O [16]. Впервые криогенный пещерный кальцит на территории России был описан нами в пещерах Среднего и Северного Урала [15]. $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ датирование (13,38; 16,70; 86,53; 104,8; 125,3 тыс. лет) показало время их формирования в периоды потеплений. Современным аналогом криогенного пещерного кальцита могут являться тонкодисперсные (30-50 мкм) сферолиты, образованные в условиях медленного замерзания при температуре близкой к нулю градусов внутри льда в пещере Мариинская.

Криогенная мука из пещер Северного (Медве, Еранка), Среднего (Усьвинская Ледяная) и Южного Урала (Победа, Аскинская), образованная при быстрой (шоковой) кристаллизации, характеризуется резким утяжелением углерода и незначительным изменением кислорода (поле V).

Изотопный состав агрегатов волокнистого карбоната из переходных зон пещер (поле VI), происхождение которых связано с испарением растворов на глинистой подложке («пух»), на стенах и потолке пещеры («лунное» молоко) и наклонных поверхностях («мягкие» гуры), несмотря на единую природу водных растворов, отличается от обычных натечных образований. Различные фациальные обстановки проявления волокнистого кальцита в переходной зоне пещеры Еранка, значительные вариации поперечного сечения нитей (почти два порядка), существенное отличие по изотопному составу от почвенного кальцита (поле II, [21]), отсутствие органики (грибов, водорослей и др.) не позволяют предполагать в качестве минералообразующей среды биогенные субстраты. Если для расположенного на глинистой подложке «пуха» применим механизм образования таких агрегатов при высачивании из пористой подложки, предложенный М.Н. Малеевым [10], то для «мягких» гур и «лунного» молока он не пригоден. «Лунное» молоко, кальцитовый «пух» и своеобразные «мягкие» гуры из переходной зоны п. Еранка могут представлять собой единый эволюционный ряд отложения карбоната кальция из частично вымороженных вод. Более пологий наклон тренда фракционирования, по сравнению с криогенной мукой, обусловлен более медленной дегазацией CO_2 , происходящей при частичном вымораживании во время стекания растворов через охлажденную часть пещеры.

Пещерный криогенный «жемчуг» из пещеры Киндерлинская (Победа), образованный в краевой части наледи при таянии льда (регелогенеза), формируется за счет высвобождения и перекристаллизации оттаявшей криогенной муки в пленке воды. Впервые такие образования были выявлены в Румынии в пещере Скаришоара [22]. Изотопный состав такого карбоната (поле VII) характеризуется незначительным утяжелением изотопного состава углерода по отношению к исходной муке. Возраст «жемчужин», установленный U/Th датированием, позволяет нам предположить, что оледенение в пещере существовало последние 1,9 тыс. лет.

Выводы

Таким образом, микроклиматическая зональность, химический состав карстующегося субстрата и агрегатное состояние воды выявляются по морфологическим и геохимическим признакам современных минеральных ассоциаций образованных в пещерах.

Использование изотопии С и О позволило выявить индикаторные отличия при минералообразовании карбонатов в различных микроклиматических зонах, подтвердить ранее выявленные тренды в пещерах Европы, а также выделить два новых тренда фракционирования. Первый связан с частичным вымораживанием растворов при стекании по охлажденной породе или льду (п. Еранка), второй – с образованием жемчуга при таянии льда и перекристаллизацией криогенной муки (п. Киндерлинская).

В холодной (отрицательной температурной аномалии) и переходной зонах можно выделить четыре типа формирования криогенной минерализации:

- 1) связанный с шоковой кристаллизацией растворов и последующей возгонкой льда в зимнее время;
- 2) связанный с процессами перекристаллизации муки при медленном замерзании;
- 3) связанный с процессами перекристаллизации увлажненной муки при положительных температурах в теплый период года;
- 4) медленная кристаллизация из пересыщенных растворов в процессе частичного вымораживания.

Минералообразование карбонатов в нейтральной зоне происходит в основном при испарении растворов на границах порода-глина, порода-вода и порода-воздух.

Продолжение геохимического и изотопного изучения и U/Th-датирование пещерных карбонатов поможет реконструировать экстремальные (холодные и теплые) периоды в истории Урала.

Библиографический список

1. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР: учеб. пособие для студентов геогр. спец. вузов. М.: Выш. шк., 1988. 328 с.
2. Григорьев Д.П., Жабин А.Г. Онтогенез минералов (индивиду). М.: Наука., 1975. 340 с.
3. Дублянский В.Н., Дублянская Г.Н. Карстование. Ч. I. Общее карстование: учеб. пособие / Перм. ун-т. Пермь, 2004. 306 с.

4. 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 / ПГНИУ [и др.]. Пермь, 2013. Вып. 16. С. 303–311.
5. 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.
6. Кадебская О.И. Криогенные образования карбонатных пещер Урала // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. / ГИ УрО РАН. Пермь, 2012. Вып. 10. С. 13–15.
7. Касимов Н.С. Геохимические барьеры в зоне гипергенеза / под ред. Н.С. Касимова и А.Е. Воробьева. М.: Изд-во МГУ, 2002. 395 с.
8. Луев Б.С., Сычкин Г.Н. О взаимосвязи неотектоники, карстопроявления и литологии алмазносных отложений Западного Урала // Палеогеоморфология и структурная геоморфология Урала и Приуралья. Уфа, 1979. С. 82–84.
9. Максимович Г.А. Еще о пещерных фосфоритах // Пещеры: сб. науч. тр. / Перм. ун-т. Пермь, 1970. Вып. 8/9. С. 5–14.
10. Малеев М.Н. Свойства и генезис природных нитевидных кристаллов и их агрегатов. М.: Наука, 1971. 199 с.
11. Перельман А.И. Геохимия: учебник для геол. спец. вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1989. 528 с.
12. Силаев В.И., Чайковский И.И., Митюшева Т.П., Хазов А.Ф. Современные карбонатные минерализации на испарительных и седиментационно-диагенетических изотопно-геохимических барьерах / Ин-т геологии КНЦ УрО РАН. Сыктывкар: Геопринт, 2008. 68 с.
13. Цыкин Р.А. Отложения и полезные ископаемые карста. Новосибирск: Наука, 1985. 165 с.
14. Чайковский И.И., Кадебская О.И. Минеральные образования пещеры Еранка на Северном Урале // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: науч. чтения памяти П.Н. Чирвинского: сб. науч. ст. Пермь, 2014. Вып. 17. С. 92–107.
15. Чайковский И.И., Кадебская О.И., Жак К. Морфология, состав, возраст и природа карбонатных сферолитов из пещер Западного Урала // Геохимия. 2014. № 4. С. 373–384.
16. *Coarsely crystalline cryogenic cave carbonate – a new archive to estimate the Last Glacial minimum permafrost depth in Central Europe* / Zak K., Richter D.K., Filippi M., Zivor R., Deininger M., Mangini A., Scholz D. // *Climate of the Past*. 2012. № 8. P. 1–17.
17. *Cryogenic and non-cryogenic pool calcites indicating permafrost and non-permafrost periods: a case study from the Herbstlabrynth-Advent Cave system (Germany)* / Richter D.K., Meissner P., Immenhauser A., Schulte U., Dorsten I. // *The Cryosphere*. 2010. № 4. P. 501–509.
18. *Encyclopedia of caves and karst science* / editor John Gunn. New York, London: Fitzroy Dearborn, 2004. V. XVIII. 902 p.
19. *Ford D.C. Karst hydrogeology and geomorphology* / Ford D.C., Williams P.W. Chichester: John Wiley and Sons, 2007. 565 p.
20. *Hill C.A. Cave Minerals of the World* / Hill C.A., Forti P. / National Speleological Society. Huntsville, 1997. 463 p.
21. *Stable carbon and oxygen isotope signatures of pedogenic needle fibre calcite* / Milliere L. et al. // *Geoderma*. 2011. № 161. P. 74–87.
22. *Žák K., Onac B.P., Perşoiu A. Cryogenic carbonates in cave environments: A review* // *Quaternary International*. 2008. V. 187, № 1. P. 84–96.

Поступила в редакцию 19.02.2016

Сведения об авторе

Кадебская Ольга Ивановна

кандидат географических наук, зав. Кунгурской лабораторией-стационаром Горного института УрО РАН;
Россия, 614007, Пермь, ул. Сибирская, 78а;
e-mail: icecave@bk.ru

About the author

Olga I. Kadebskaya

Candidate of Geographical Science, Head of the Kungur laboratory, Mining Institute of Ural Branch of RAS,
78a, Sibirskaya str., Perm, 614007, Russia;
e-mail: icecave@bk.ru

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Кадебская О.И. Процессы современного минералообразования в карбонатных пещерах Урала, связанные с различными микроклиматическими обстановками // Географический вестник. 2016. №1(36). С. 5–17.

Please cite this article in English as:

Kadebskaya O.I. Processes of modern formation of new minerals in different microclimatic conditions of carbonate caves of Urals // Geographicheskii Vestnik. 2016. №1(36). P. 5–17.

УДК 551.435.1

С.В. Копытов**ОСОБЕННОСТИ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЕСКА В РУСЛОВОЙ ФАЦИИ РАЗНОВОЗРАСТНЫХ ПОЙМЕННЫХ ГЕНЕРАЦИЙ ВЕРХНЕЙ КАМЫ***

Анализ слоистости пойменных отложений в обнажениях береговых уступов и кернах пойменных генераций разного возраста выявил ряд особенностей расположения и концентрации в разрезе русловой фации аллювия. Наиболее перспективной для добычи песка является пойма первой и второй генераций, представленная прирусловыми отмелями. Средние мощности мелкозернистого песка составляют 1,5 м. Особенности дифференциации содержания песка в русловой фации третьей, четвертой, пятой и шестой генераций зависят от морфодинамического типа русла и природных обстановок конкретной эпохи голоцена. Из более древних сегментов наиболее пригодными для добычи песка являются пойма третьей и четвертой генераций. Пойма пятой и шестой генераций ввиду труднодоступного расположения и низкого качества песка в русловой фации для разработки песчано-гравийных материалов малоперспективны. Трудности в разработке песков древних генераций могут создать и большие толщи перекрывающей пойменной фации.

К л ю ч е в ы е с л о в а: песчано-гравийные отложения, песок, пойма, пойменная генерация, русловая фация аллювия.

S.V. Kopytov**FEATURES OF SAND CONCENTRATION IN CHANNEL FACIES OF DIFFERENT-AGE FLOODPLAIN GENERATIONS OF UPPER KAMA**

Analysis of floodplain deposits bending in coast scarp outcrops and cores of different-age floodplain generations revealed a number of features of alluvial channel facies location and concentration in sequence. First and second floodplain generations are most promising for sand extraction. These floodplains are presented pointed bars. Differentiation of content features in alluvial channels facies of third, fourth, fifth and sixth generations are depend from types of morphodynamics channels and nature situation of Holocene specific age. Third and fourth floodplain generation are highly suitable from older segments for sand extraction. Fifth and sixth floodplain generations occupy inaccessible position. These floodplains are of poor quality sand in alluvial channel facies. These floodplains are little perspective for sand extraction. Difficulties in sand extraction can create big successions of floodplain facies.

K e y w o r d s: sand and gravel deposits, sand, floodplain, floodplain generation, alluvial channel facies.