УСЛОВИЯ И МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ГИПСА В РЫХЛЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ (НА ПРИМЕРЕ НОВОАФОНСКОЙ ПЕЩЕРЫ, АБХАЗИЯ)

О. Я. Червяцова, С. С. Потапов, В. И. Ракин, С. Н. Сергеев, Р. С. Дбар, Я. А. Экба

Conditions and morphological features of gypsum crystallization in loose sediments (on the example of the Novoafon cave, Abkhazia)

O. Ya. Chervyatsova, S. S. Potapov, V. I. Rakin, S. N. Sergeev, R. S. Dbar, J. A. Ekba

The article presents the results of investigations of sulfate (gypsum) mineral formation in the southern halls of the Novoafon cave in the conditions of a loose loamy aggregate. These sediments, which are sediments of cave lakes, refer to pseudomiosilites and myosilites – essentially quartz rocks, poor hydrolysates. The southern halls of the cave are characterized by air temperatures from 12.2 to 13.4 °C. The maxima and minima lag behind the surface for 2-3 months. Observations of the relative humidity of air are fragmentary, but there are data on its significant fluctuations, increased as a result of anthropogenic transformation of the air circulation system (the appearance of artificial tunnels). The studied aggregates of gypsum are characterized by a size range from less than 1 mm and up to 3-4 cm and a wide variety of morphological types. Gypsum is represented by skeletal crystals on which parts of facets of simple forms occur: {010}, {121}, {110} and rarely {011}. Rounded, lateral with respect to the planes of perfect cleavage {010} of the gypsum surface, speak of a diffuse growth regime. Such a regime can be explained by the composition of the sediments: the clay layers in their composition during the moistening of the cave accumulated capillary water, which was slowly deposited into the growth substrate during the dry periods. Most researchers indicate that in the processes of secondary redeposition of gypsum in caves (irrespective of its initial source) the main role is played by the processes of alternation of moisture with evaporation. Therefore, this type of secondary gypsum mineralization can be considered as an indicator of the microclimatic regime with high-amplitude fluctuations in the relative humidity of air, which has been preserved for a long time. Its further study using isotope techniques can help in the reconstruction of the natural regime of air humidity in the cave (before the anthropogenic transformation of the microclimatic regime).

Keywords: sulfates; secondary mineral formations; gypsum; morphology of crystals; genesis of minerals.

Приводятся результаты исследований сульфатного (гипсового) минералообразования в южных залах Новоафонской пещеры в обстановке рыхлого суглинистого заполнителя. Эти отложения, представляющие собой осадки пещерных озер, относятся к псевдомиосилитам и миосилитам – существенно кварцевым породам, бедным гидролизатами. Южные залы пещеры характеризуются температурами воздуха от 12,2 до 13,4 °C. Максимумы и минимумы запаздывают относительно поверхности на 2–3 месяца. Наблюдения за относительной влажностью воздуха фрагментарны, но имеются сведения о ее значительных колебаниях, увеличившихся в результате антропогенной трансформации системы циркуляции воздуха (появления искусственных тоннелей). Изученные агрегаты гипса характеризуются размерным диапазоном от менее 1 мм до 3–4 см и широким набором морфологических типов. Гипс представлен скелетными кристаллами, на которых встречаются участки граней простых форм: {010}, {121}, {110}, редко {011}. Округлые, боковые по отношению к плоскостям совершенной спайности {010} поверхности гипса свидетельствуют о диффузном режиме роста. Такой режим может объясняться составом осадков: имеющиеся в их составе глинистые прослойки во время увлажнения пещеры аккумулировали капиллярную воду, которая медленно отдавалась в ростовой субстрат во время сухих периодов. Большинство исследователей указывают на то, что в процессах вторичного перераспределения гипса в пещерах (независимо от его исходного источника) основную роль играют процессы чередования увлажнения с испарением. Поэтому этот тип вторичной гипсовой минерализации можно рассматривать как показатель микроклиматического режима с высокоамплитудными колебаниями относительной влажности воздуха, сохранявшегося на протяжении длительного времени. Его дальнейшее изучение с применением изотопных методов может помочь в реконструкции естественного режима влажности воздуха в пещере (до антропогенной трансформации микроклиматического режима).

Ключевые слова: сульфаты; вторичные минеральные образования; гипс; морфология кристаллов; генезис минералов.

Введение
Новоафонская (Анакопийская) пещера находится на черноморском побережье Абхазии, в городе Новый Афон. Она расположена в западной части хребта Аж-Амтва, имеющего антиклинальное строение, в 300-метровой толще толстослоистых локально доломитизированных кремнистых известняков баррема (K_1^b), слагающих ядро антиклиналя. Протяженность пещеры составляет 3300 м, объем 1 006 600 м³. Естественный вход представляет собой систему вертикальных колодцев глубиной более 180 м, соединяющуюся с субгоризонтальной частью узким проходом в северо-восточной части зала Анакопия. Пещерная система была исследована в начале 1960-х гг., а с 1975 г. функционирует в качестве экскурсионного объекта.

На широкое распространение гипсовой минерализации в пещере впервые обратил внимание З. К. Тинтилов. Согласно

наиболее ранней трактовке [1], ее появление связано с наличием во вмещающих известняках гипотетических прослоек морского осадочного (эвапоритового) гипса. В 1980-х гг. В. Н. Дублянский высказал предположение об образовании гипса за счет окисления сероводорода из глубинных вод и реакции серной кислоты с карбонатными породами [2]. Процесс, называемый в современной литературе сернокислотным спелеогенезом (*sulfuric acid speleogenesis* – SAS), хорошо изучен во многих карстовых районах мира. Дальнейшее изучение морфологических, структурно-текстурных и изотопных характеристик гипса позволило найти подтверждение этой гипотезы [3]. К «первичным» гипсовым отложениям, образовавшимся непосредственно при сернокислотном замещении известняка, относятся массивные микрокристаллические коры и изометричные «карманы замещения» (*replacement pockets*), распространенные в южных залах пещерной системы.

Настоящая работа посвящена изучению современного сульфатного минералообразования Новоафонской пещеры в обстановке рыхлого суглинистого заполнителя, представляющего собой осадки пещерных озер (озерно-кольматационные отложения по З. К. Тинтилову [1]).

Большинство исследований свидетельствуют о том, что в процессах вторичного перераспределения гипса в пещерах, в частности, внутри рыхлого заполнителя (независимо от его исходного источника: морские эвапориты для пещер сульфатного карста или «гипс замещения» для SAS-пещер), основную роль играют процессы чередования летней конденсации с зимним испарением. Согласно исследованиям F. Gázquez и др. [4] на примере пещер юга Испании, наиболее благоприятные условия для перераспределения гипса складываются при сезонном понижении влажности воздуха зимой до 75–85 %. Поэтому развитие вторичной гипсовой минерализации в пещерах находится в тесной связи с микроклиматическими условиями, – его иногда рассматривают как признак сухих периодов [5].

Отбор образцов и аналитические методы

Отбор образцов рыхлых отложений, содержащих агрегаты гипса, осуществлялся в мае 2016 г. на двух точках с различным гидрологическим режимом, показанных на рис. 1.

Точка № 1 расположена в верхней части восходящего юго-восточного тупикового ответвления между залами Махаджиров и Нартаа, выше уровня современного подъема паводковых вод. Гип-

Рисунок 1. Точки отбора образцов на плане Новоафонской пещеры.

Рисунок 2. Точки отбора образцов. а – № 1, юго-восточное тупиковое ответвление между залами Махаджиров и Нартаа; б – № 2, южное ответвление зала Нартаа; в – № 2, шурф.

совые агрегаты обильны, расположены россыпью в поверхностном слое комковатого глинисто-песчаного материала (рис. 2, а).

Точка № 2 находится в южном тупиковом ответвлении зала Нартаа. До строительства водоотводящих тоннелей она периодически подвергалась затоплению при паводках, о чем свидетельствуют уровни стояния воды на стенах. Последний паводок, вызвавший подъем пещерных озер выше этой отметки (60 м над уровнем моря), был зарегистрирован в сентябре 1975 г. [1]. На поверхности встречаются частично растворенные гипсовые иглы, загрязненные озерными осадками, «пережившие» паводки (рис. 2, б), и скопления обломочного материала (дресвы) размером 1–5 мм, являющегося продуктом выветривания пород стен. Рыхлый заполнитель имеет слоистую текстуру (рис. 2, в), отражающую изменение гидродинамических условий: светлые слои, сложенные кварцевыми зернами преимущественно песчаной и алевритовой размерности, отложенными проточной водой, чередуются с темными глинистыми слоями озерных условий отложения. Наибольшее развитие гипса отмечается во втором от поверхности (преимущественно глинистом) слое до глубины около 7 см.

Исследование морфологии образцов проводилось под бинокулярным микроскопом, а также на сканирующем электронном микроскопе TESCAN Vega 3 SBH с энергодисперсионным спек-

трометром X-ACT (Oxford Instruments) в Институте проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа (аналитики С. Н. Сергеев, И. И. Мусабиров).

Микроклиматическая характеристика

В настоящее время воздухообмен пещеры происходит за счет разницы высот примерно в 190 м между естественным входом «Бездонная яма», зонами проницаемости по трещинам, а также искусственными тоннелями [6]. На рис. 3 показана сезонная динамика некоторых микроклиматических параметров на основании режимных наблюдений, проводившихся в 2006 г. Потоки воздуха, связанные с разницей в плотности наружного и пещерного воздуха, меняют скорость и направление в зависимости от температуры воздуха на поверхности: в холодное время года (XI–III) наблюдается восходящая, а в теплое время года (V–X) нисходящая циркуляция (рис. 3, а). Система циркуляции воздуха в пещере в значительной мере трансформирована строительством водоотводящего и транспортного тоннелей. Южные залы пещеры характеризуются температурами воздуха от 12,2 до 13,4 °С. Максимумы и минимумы запаздывают относительно поверхности на 2–3 месяца, что говорит об относительной инерционности системы (рис. 3, б).

Режимные наблюдения за влажностью воздуха в последние годы не проводились. По данным З. К. Тинтилозова (1983), относи-

Рисунок 3. Микроклиматические условия южных залов. а – сезонное изменение скорости воздушного потока в зале Анакопия, в узком проходе («Ворота Арсена») на соединении с вертикальной частью; б – сезонный ход температур воздуха.

Рисунок 4. Характеристика озерно-кольматационных отложений зала Махаджиров [1]. а – диаграмма SiO₂-Al₂O₃-CaO: 1, 2 – поля составов для валовых проб и пелитовой фракции глинистых пещерных осадков [8]; 3, 4 – валовые пробы и пелитовая фракция осадков зала Махаджиров; б – ГМ-НKM диаграмма [9] для осадков зала Махаджиров: 1, 2 – поля составов для валовых проб и пелитовой фракции.

тельная влажность воздуха в южных залах пещеры до начала эксплуатации как туристического объекта составляла 98–100 % [1]. С началом эксплуатации наблюдается уменьшение влажности на 5–6 %, связанное как с тепловой нагрузкой, так и с интенсификацией воздухообмена через искусственные тоннели [7]. Имеются данные (В. В. Мархолия, устное сообщение), что в период с 1989 по 2010 г. в водоотводящем тоннеле отсутствовал ветрозащитный шлюз, что привело к существенному понижению влажности (особенно зимой) и высыханию озерно-кольматационных отложений в южных залах с формированием такыра. В настоящее время шлюз восстановлен, однако он не герметичен, поэтому потоки воздуха через тоннель сохраняются. По данным измерений в мае 2016 г., относительная влажность воздуха в южных залах пещеры составляла 97–99 %.

Несмотря на относительную стабильность микроклиматического режима, имеются сведения о значительных колебаниях относительной влажности воздуха, способствующих чередованию увлажнения и высыхания субстратов.

Озёрно-кольматационные отложения

Этот тип отложений, являющийся обстановкой для кристал-

лизации рассматриваемых агрегатов гипса, выделен З. К. Тинтиловым [1] и генетически связан с осадками постоянных и временных озёр, а также паводковых водотоков южных залов пещеры.

Данные по химическому составу восьми образцов озерно-кольматационных глинистых отложений из зала Махаджиров (изучались относительно свежие осадки зоны затопления), приведенные в табличном виде в монографии З. К. Тинтилозова [1], сравнивались с составами, полученными для шести пещер Кавказа, Крыма и Урала [8].

Сульфаты в составе отложений имелись в следовых количествах или отсутствовали. На диаграмме SiO₂-Al₂O₃-CaO (рис. 4, а) видно, что состав пелитовой фракции образует компактное поле, несколько отличающееся от диапазона, приведенного в цитируемой работе [8], в сторону увеличения содержания SiO₂ и уменьшения Al₂O₃, что указывает на увеличение доли кварца в осадке. По валовому составу отмечается тренд отрицательной корреляции CaO с SiO₂ и Al₂O₃, что говорит о нахождении этих элементов в минералах, осаждавшихся в различных условиях (например, аллотигенные кварц и алюмосиликаты переотлагались из паводковых вод механическим путем, а кальцит отлагался аутигенным

Рисунок 5. Основные морфологические типы агрегатов гипса. а – точка отбора № 1, юго-восточное тупиковое ответвление между залами Махаджиров и Нартаа; б, в – точка отбора № 2. Пояснения в тексте.

Рисунок 6. Сканирующие электронные микрофотографии гипсовых агрегатов с точки отбора № 1.

путем в условиях низкой обводненности). Также для осадков зала Махаджиров авторами статьи были вычислены некоторые литохимические модули [9]. Гидролизатный модуль (ГМ) составляет от 0,26 до 0,32 для валовых проб и 0,23–0,28 для пелитовой фракции, что позволяет в большинстве случаев отнести их к псевдомиосилитам ($MgO > 3\%$) и миосилитам – существенно кварцевым породам, бедным гидролизатами. Модуль нормированной щелочности (НKM) для валовых проб составляет от 0,17 до 0,25 и от 0,19 до 0,34 для пелитовой фракции, что для миосилитов соответствует нормощелочному и (реже) гипощелочному показателю (рис. 4, б).

Морфология сростков гипса

Основные морфологические типы агрегатов гипса показаны на рис. 5. В образцах с обеих точек преобладают удлинённые игольчатые агрегаты длиной 4–7 мм, часто усложнённые «отростками», примыкающими под углом 95° – 108° (рис. 5, а, № 1, 5, 6; рис. 5, б, № 5–8) и реже под углом 130° (рис. 5, а, № 2, 3). Для образцов с точки отбора № 1 также характерны пластинчатые кристаллы неправильной формы, тоже имеющие субперпендикулярные «отростки» (рис. 5, а, № 11–15). В образцах с точки отбора № 2 отмечаются искривлённые кораллоподобные (рис. 5, б, № 12–16) и уплощённые чечевицеобразные (рис. 5, б, № 17–20) агрегаты. Редко наблюдаются макроагрегаты сложной формы размерами 3–4 см (рис. 5, в).

Электронно-микроскопические фотографии, показывающие особенности строения агрегатов, приведены на рис. 6. Гипс представлен скелетными кристаллами, на которых встречаются участки граней простых форм: $\{010\}$, $\{121\}$, $\{110\}$ и редко $\{011\}$. Прямых признаков двойникования кристаллов гипса не найдено, но ориентация фрагментов «скелетных» кристаллов под прямым углом друг к другу косвенно свидетельствует о распространении явления двойникования в ходе роста «скелета».

Максимальные по площади (идеальные) плоские грани, ориентированные на наблюдателя (рис. 6, а, б), – это плоскости совершенной спайности $\{010\}$ гипса. Боковые поверхности, на которых часто представлены плоские сетки $\{121\}$ и $\{110\}$, искривлены и плохо диагностируются. На снимке (рис. 6, в) трещиноватость крупного кристалла по плоскостям совершенной спайности $\{010\}$ указывает на его ориентацию, но поверхность, ориентированную на наблюдателя, не удалось диагностировать (отсутствие рефлекса). Наиболее плоские грани здесь и далее – это всегда $\{010\}$. На фото (рис. 6, г) плоские грани (ориентированные на наблюдателя), это $\{010\}$. Однако боковые поверхности не идеально плоские и точно установить принадлежность их к данным простым формам нельзя. На снимке (рис. 6, е) фрагмент скелета диагностирован, – здесь наиболее вероятными гранями являются $\{121\}$, $\{011\}$ и $\{110\}$. На других снимках (рис. 6, ж, з, и) трещины указывают на плоскости спайности $\{010\}$, но боковые поверхности нельзя точно индексировать.

Обсуждение результатов

Считается, что игольчатый облик кристаллов гипса отражает условия быстрого роста при недостатке раствора [10]. Эта форма является одной из наиболее распространённых форм вторичной кристаллизации гипса в условиях рыхлых пещерных отложений. Генезис гипсовых игл связывают с испарением капиллярных растворов. В изученной коллекции большая часть тоже представлена иглоподобными агрегатами, однако были развиты и более сложные формы. В работе [11] показано, что на габитус кристаллов гипса, растущих в рыхлых отложениях, влияет гранулометрический состав осадка, что, в свою очередь, определяет разную водопроницаемость и влагоемкость.

В целом округлые, боковые по отношению к плоскостям совершенной спайности $\{010\}$ поверхности гипса говорят о диффузном режиме роста. Поэтому «скелетные» формы, найденные в осадках Новоафонской пещеры, можно интерпретировать как скелетоподобные сростки кристаллов гипса, растущие в диффузном режиме. Срастание, точнее, образование субиндивидуальной новой генерации чаще всего происходит в параллельном положении. Двойникование трудно диагностировать из-за сглаженных поверхностей кристаллов.

Кривоугонные чечевицеобразные кристаллы типичны для глинистых субстратов [12]. Изменение их формы, связанное с

исчезновением одних граней и разрастанием других, объясняется особенностью диффузного роста в вязкой среде. Также некоторые авторы связывают деформацию кристаллов гипса с наличием натрия в среде.

Для агрегатов, найденных в суглинках, можно рассмотреть два возможных источника сульфатов. Во-первых, насыщение озерно-кольматационных суглинков сульфатами может быть связано с растворением во время паводков гипса, являющегося продуктом сернокислотного спелеогенеза. Во-вторых, может быть местный источник за счет развитых в этой части пещеры субаэральных гипсовых отложений (антолитов, корочек), образовавшихся за счет испарения капиллярных растворов горных пород. Эти отложения отличаются от сульфатов, образованных по SAS-механизму, в сторону более легкого изотопного состава серы, что указывает на иной источник, вероятно, за счет локального окисления зерен сульфидов в известняках [3].

Разнообразие морфологических типов гипсовых агрегатов может объясняться составом озерно-кольматационных отложений: имеющиеся в их составе глинистые прослойки во время увлажнения пещеры насыщались капиллярной влагой, которая медленно отдавалась в ростовой субстрат во время сухих периодов.

В качестве дискуссии следует отметить роль вторичных гипсовых отложений для индикации микроклиматического режима в пещере. Как отмечалось ранее, для роста подобных агрегатов обязательным условием является сезонное чередование увлажнения субстратов с активным испарением. Подобный режим может быть обеспечен в условиях активной вентиляции полости наружным воздухом. Имеется мнение, что первоначально пещера почти не имела естественной вентиляции, а современный динамический режим с сезонным реверсом потоков воздуха (рис. 2, а) сформировался после строительства искусственных тоннелей. Однако рост гипсовых агрегатов в отложениях зала Нартаа, перекрытых в дальнейшем озерными отложениями (рис. 2, в), предполагает наличие продолжительных периодов сезонных колебаний влажности и, следовательно, активного воздухообмена в пещере и до строительства тоннеля (при изолированности подземных полостей от воздушных потоков относительная влажность воздуха стремится к 100 %, что препятствует испарению, необходимому для насыщения поровых растворов). Оценки значений относительной влажности воздуха, при которой происходило испарительное насыщение субстратов, могут быть сделаны после изучения изотопного состава кристаллизационной воды в гипсе [4]. Немногочисленные данные о скорости роста игольчатых агрегатов гипса в рыхлых отложениях пещер, приводимые различными авторами, дают довольно близкие оценки: 0,1–0,211 мм/год [13]; 0,07 мм/год [14]; 0,16–0,38 мм/год [15]. Игольчатые сростки величиной 1,5 см могли вырасти примерно за 150 лет, а для крупных агрегатов требовалось значительно более продолжительное время.

Заключение

Современная кристаллизация гипса в обстановке рыхлого суглинистого заполнителя (осадки пещерных озер) широко распространена в залах Новоафонской пещеры. Изученные агрегаты характеризуются размерным диапазоном от менее 1 мм до 3–4 см и широким набором морфологических типов. Гипс представлен скелетными кристаллами, на которых встречаются участки граней простых форм: $\{010\}$, $\{121\}$, $\{110\}$ и редко $\{011\}$. Округлые, боковые по отношению к плоскостям совершенной спайности $\{010\}$ поверхности гипса говорят о диффузном режиме роста. Такой режим может объясняться составом осадков: имеющиеся в их составе глинистые прослойки во время увлажнения пещеры аккумулировали капиллярную воду, которая медленно отдавалась в ростовой субстрат во время сухих периодов.

Согласно многочисленным исследованиям, для роста подобных агрегатов в пещерах обязательным условием является сезонное чередование увлажнения субстратов с активным испарением. Поэтому этот тип вторичной гипсовой минерализации можно рассматривать, как индикатор микроклиматического режима с высокоамплитудными колебаниями относительной влажности воздуха, сохранявшегося на протяжении длительного времени [4, 5]. В дальнейшем целесообразно изучить изотопный состав кристаллизационной воды в гипсе, что даст возможность

реконструировать условия относительной влажности в пещере на момент роста агрегатов (а это представляет интерес для понимания естественного микроклиматического режима пещеры до его техногенной трансформации).

Авторы благодарны Л. Ю. Кузьминой и С. А. Капранову за участие в полевых работах, а также сотрудникам комплекса Новоафонской пещеры В. В. Мархольца и Б. А. Пандария за помощь в организации исследования.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-55-40005 Абх_а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тинтилов З. К. Новоафонская пещерная система. Тбилиси: Мецниереба, 1983. 151 с.
2. Dublyansky V. N. Hydrothermal karst in Alpine folded belt of southern part of USSR // Kras. Spel. 1980. Vol. XII. P. 18–38.
3. Червяцова О. Я., Потапов С. С., Садыков С. А., Леонова Л. В., Дбар Р. С. Распространение, морфология, изотопный состав серы и генезис гипсовых отложений в Новоафонской пещере (Абхазия) // Минералогия. 2016. № 3. С. 79–94.
4. Gázquez, F., Calaforra, J. M., Evans, N. P., & Hodell, D. A. Using stable isotopes ($\delta^{17}\text{O}$, $\delta^{18}\text{O}$ and δD) of gypsum hydration water to ascertain the role of water condensation in the formation of subaerial gypsum speleothems // Chemical Geology. 2017. Vol. 452. P. 34–46.
5. Calaforra J. M., Forti P., Fernandez-Cortes A. Speleothems in gypsum caves and their paleoclimatological significance // Environmental geology. 2008. Vol. 53, No. 5. P. 1099–1105.
6. Экба Я. А., Ахсалба А. К., Ларченко И. Н., Закирян Р. Г. Некоторые особенности моделирования воздухообмена карстовых пещер // Докл. АМАН. 2011. Т. 13, № 2. С. 122–128.
7. Ланчава О. А., Цикаришвили К. Д. О необходимости мониторинга благоустроенных карстовых пещер с целью их оптимальной эксплуатации (на примере Новоафонской и Цхалтубской пещер) // Комплексное использование и охрана подземных пространств: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. Пермь, 2014. С. 123–129.
8. Матреничев В. А., Климова Е. В. Глинистые отложения пещер // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2015. Вып. 4. С. 65–82.
9. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с.
10. Couturaud A. Les aiguilles de gypse du Verneau (Doubs) // Karstologia: revue de karstologie et de spéléologie physique. 1986. № 8. 2e semestre. P. 13–16.
11. Al-Youssef M. Gypsum Crystals Formation and Habits, Umm Said Sabkha, Qatar // Sabkha Ecosystems: Vol. IV: Cash Crop Halophyte and Biodiversity Conservation. Springer Netherlands, 2014. С. 23–54.
12. Шафрановский И. И., Сальда Э. П. Чечевицеобразные кристаллы гипса из Крыма // Кристаллография: тр. Федоровской науч. сессии 1951 г. М.: Л.: Углетехиздат, 1952. С. 177–188.
13. Peck S. B. A growth rate for cave gypsum needles // NSS Bulletin. 1977. Vol. 39. P. 104–105.
14. Landis C. Notes on growth rate of gypsum crystals // National Speleological Society, Nittany Grotto News. 1961. Vol. 9. P. 102.
15. Polyak V. J., Davis D. G., Provencio P. P., Asmerom Y. Proposed Age and origin of gypsum needles of Crystal Crawl, Fort Stanton Cave, New Mexico //

New Mexico geological society guidebook, 65th Field conference, Geology of the Sacramento Mountains Region, 2014. P. 157–162.

REFERENCES

1. Tintilov Z. K. 1983. *Novoafonskaya peshchernaya sistema* [Novoafon cave system], Tbilisi, 151 p.
2. Dublyansky V. N. 1980. Hydrothermal karst in Alpine folded belt of southern part of USSR. Kras. Spel., vol. 12, pp. 18–38.
3. Chervyatsova O. Ya., Potapov S. S., Sadykov S. A., Leonova L. V., Dbar R. S. 2016. *Rasprostraneniye, morfologiya, izotopnyy sostav sery i genezis gipsovykh otlozheniy v Novoafonskoy peshchere (Abkhaziya)* [Distribution, morphology, isotope composition of sulfur and genesis of gypsum deposits in the Novoafon cave (Abkhazia)]. *Mineralogiya* [Mineralogy], no. 3, pp. 79–94.
4. Gázquez, F., Calaforra, J. M., Evans, N. P., & Hodell, D. A. 2017. Using stable isotopes ($\delta^{17}\text{O}$, $\delta^{18}\text{O}$ and δD) of gypsum hydration water to ascertain the role of water condensation in the formation of subaerial gypsum speleothems. *Chemical Geology*, vol. 452, pp. 34–46.
5. Calaforra J. M., Forti P., Fernandez-Cortes A. 2008. Speleothems in gypsum caves and their paleoclimatological significance. *Environmental geology*, vol. 53, no. 5, pp. 1099–1105.
6. Ekba Ya. A., Akhsalba A. K., Larchenko I. N., Zakinyan R. G. 2011. *Nekotorye osobennosti modelirovaniya vozdukhobmena karstovykh peshcher* [Some features of modeling the air exchange of karst caves]. *Dokl. AMAN* [Doklady AIAS], vol. 13, no. 2, pp. 122–128.
7. Lanchava O. A., Tsikarishvili K. D. 2014. *O neobkhodimosti monitoringa blagoustroennykh karstovykh peshcher s tsel'yu ikh optimal'noy ekspluatatsii (na primere Novoafonskoy i Tskhaltubskoy peshcher)* [On the need to monitor well-maintained karst caves for the purpose of optimal exploitation (on the example of New Athos and Tskhaltubsky caves)]. *Kompleksnoe ispol'zovanie i okhrana podzemnykh prostranstv: sb. dokl. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Complex use and protection of underground spaces: a collection of reports of the International Scientific and Practical Conference], Perm', pp. 123–129.
8. Matrenichev V. A., Klimova E. V. 2015. *Glinistye otlozheniya peshcher* [Clay deposits of caves]. *Vestnik SPbGU. Nauki o zemle* [Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences], vol. 7, no. 4, pp. 65–82.
9. Yudovich Ya. E., Ketris M. P. 2000. *Osnovy litokhimii* [Fundamentals of lithochemistry], St. Petersburg, 479 p.
10. Couturaud A. 1986. Les aiguilles de gypse du Verneau (Doubs) [Gypsum needles from Verneau (Doubs)]. *Karstologia: revue de karstologie et de spéléologie physique* [Karstologia: review of karstology and physical caving], no. 8, 2e semestre, p. 13–16.
11. Al-Youssef M. 2014. Gypsum Crystals Formation and Habits, Umm Said Sabkha, Qatar. *Sabkha Ecosystems: Vol. IV: Cash Crop Halophyte and Biodiversity Conservation*, Springer Netherlands, pp. 23–54.
12. Shafranovskiy I. I., Sal'dau E. P. 1952. *Chechevitseobraznye kristally gipsa iz Kryma* [Lenticular crystals of gypsum from Crimea]. *Kristallografiya: tr. Fedorovskoy nauch. sessii 1951 g.* [Crystallography: Works of the Fedorov Scientific Session of 1951], Moscow, p. 177–188.
13. Peck S. B. 1977. A growth rate for cave gypsum needles. *NSS Bulletin*, vol. 39, pp. 104–105.
14. Landis C. 1961. Notes on growth rate of gypsum crystals. *National Speleological Society, Nittany Grotto News*, vol. 9, p. 102.
15. Polyak V. J., Davis D. G., Provencio P. P., Asmerom Y. 2014. Proposed Age and origin of gypsum needles of Crystal Crawl, Fort Stanton Cave, New Mexico. *New Mexico geological society guidebook, 65th Field conference, Geology of the Sacramento Mountains Region*, pp. 157–162.

Ольга Яковлевна Червяцова

kittary@ya.ru

Государственный заповедник «Шульган-Таш»
Россия, Республика Башкортостан, Бурзянский район,
дер. Иргизлы, ул. Заповедная, 14

Сергей Сергеевич Потапов,

s_almazov@74.ru

Институт минералогии УрО РАН
Россия, Челябинская область, Миасс,
Миасский тракт

Владимир Иванович Ракин

rakin@geo.komisc.ru

Институт геологии Коми НЦ УрО РАН
Сыктывкар, ул. Первомайская, 54

Семен Николаевич Сергеев

imsp@imsp.ru

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН
Россия, Республика Башкортостан
Уфа, ул. Степана Халтурина, 39

Роман Саидович Дбар,

romandbar@mail.ru

Январби Алиевич Экба

ekba-yan@yandex.ru

Институт экологии АНА
Республика Абхазия, Сухум, ул. Красномаяцкая, 67

Ol'ga Yakovlevna Chervyatsova

kittary@ya.ru

State National park «Shul'gan-Tash»
Irgizly village, The Republic of Bashkortostan,
Russia

Sergey Sergeevich Potapov

s_almazov@74.ru

Institute of Mineralogy of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences
Miass, Russia

Vladimir Ivanovich Rakin,

rakin@geo.komisc.ru

Institute of Geology of Komi Science Centre of RAS
Syktyvkar, Russia

Semen Nikolaevich Sergeev

imsp@imsp.ru

Institute for Metals Superplasticity Problems
of the Russian Academy of Sciences
Ufa, Russia

Roman Saidovich Dbar,

romandbar@mail.ru

Yanvarby Aliевич Ekba

ekba-yan@yandex.ru

Institute of Ecology of the Academy of Sciences of Abkhazia
Sukhum, Abkhazia