

УДК 549.0 : 553.2

DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-3-5

**ЯЧЕЙКИ БЕНАРА – ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ
СУБАКВАЛЬНЫХ И СУБФЛЮИДНЫХ СТАЛАКТИТОВ****В.А. Попов¹, М.В. Цыганко²**¹ Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; popov@mineralogy.ru² Минералогический музей «Штуфной кабинет», ул. Ватутина 17а,
г. Североуральск, Свердловская обл., 624480 Россия

Статья поступила в редакцию 4.07.2023 г., принята к печати 11.09.2023 г.

**BENARD CELLS – A POSSIBLE MECHANISM OF THE FORMATION
OF SUBAQUATIC AND SUBFLUIDIC STALACTITES****V.A. Popov¹, M.V. Tsyganko²**¹South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk region, 456317
Russia; popov@mineralogy.ru²Mineralogical Museum «Shtufnoi Kabinet», ul. Vatutina 17a, Severouralsk,
Sverdlovsk region, 624480 Russia

Received 4.07.2023, accepted 11.09.2023

Аннотация. Рассмотрен механизм формирования сталактитов в гравитационном поле Земли при образовании их в воздушных, субаквальных и субфлюидных (магматических) системах. Если системы представлены полостями в твердых телах с окружающим капиллярно-пористым пространством, заполненными жидкостями, то в некоторых случаях возникают конвективные подсистемы – ячейки Бенара, фиксирующиеся образованием сталактитов. Явление иллюстрируется примерами малахитовых, гётитовых, халцедоновых, кварц-полевошпатовых и магнетитовых сталактитов.

Ключевые слова: сталактиты, ячейки Бенара, карбонатиты.

Abstract. The mechanism of formation of stalactites in gravity field of the Earth during their formation in air and subaquatic and subfluidic (magmatic) systems is considered. If the systems represent the cavities in solid bodies with ambient capillary-porous space filled with liquids, then it locally yields the convective subsystems: the Benard cells fixed by the formation of stalactites. The phenomenon is illustrated on examples of malachite, goethite, chalcedony, quartz-feldspar and magnetite stalactites.

Keywords: stalactites, Benard cells, carbonatites.

В процессе минералогических наблюдений исследователь нередко сталкивается с морфологическими признаками гравитационных явлений. Весьма наглядным из них является образование сталактитов в пещерах (полостях). В литературе можно найти данные о разном происхождении пещер: тектоническом, эрозионном, ледниковом, вулканическом и карстовом (самая большая группа). Карстом называют явления и процессы, обусловленные деятельностью вод (или других жидкостей?), проявляющиеся в растворении горных пород и появлении в них полостей. Полости могут быть заполнены газами (воздухом), водой (водным

раствором), другими жидкостями (нефтями, расплавами-растворами, коллоидными растворами) и минеральными агрегатами различного происхождения.

Образование минеральных агрегатов в виде сталактитов (и сталагмитов) в воздушных пещерах легко наблюдаемо и механизмы их формирования многократно рассмотрены спелеологами и минералогами. Сталактитами называют хемогенные отложения в (карстовых) полостях в виде образований, свешивающихся с потолка (сосульки, соломинки, гребенки, бахромы и т.п.) (Максимович, 1963).

Субаквальные сталактиты формируются ниже уровня воды или на контакте водной поверхности с воздухом. Вид субаквальных сталактитов внешне похож на «воздушные» (субтерральные) сталактиты и в их положении читается влияние гравитации (рис. 1).

Предположительно субаквальные сталактиты гётита, халцедона и малахита наблюдались нами в обширной коллекции Н.И. Козина из Меднорудянского медного месторождения (Попов и др., 2015). Карстовые образования на нем находились под речкой Рудянкой, распространяясь до глубины 208 м. Отсюда можно считать, что полости были заполнены карстовыми водами (до времени проходки глубоких шахт). По независящим от нас причинам, проиллюстрировать субаквальные меднорудянские сталактиты мы можем только на примере гётита (рис. 2). Сталактиты халцедона и малахита (рис. 3) демонстрируются, как аналогичные меднорудянским, из Интернет-источников.

Если для обычных («воздушных») сталактитов пересыщение возникает не только за счет выхода раствора из капилляров в полость (падения давления), но и за счет испарения растворителя из стекающей вниз капли, то для субаквальных сталактитов остается только пересыщение, связанное



Рис. 1. Субаквальные сталактиты в подводной пещере. Фото из открытых Интернет-источников.

Fig. 1. Subaquatic stalactites in an underwater cave. Photos from open Internet sources.

с падением давления при выходе насыщенного раствора из капилляра в полость. Насыщенный раствор в капиллярах (тонких трещинах) является более плотным (тяжелым) по сравнению с насыщенным раствором в заполненной полости. Выходя из капилляра вниз в полость, он сразу становится пересыщенным вследствие падения давления и опре-



Рис. 2. Сталактиты гётита (слева) и сросток гётитовых сталактитов в сколе (справа). Меднорудянское месторождение. Фото М. Б. Лейбова.

Fig. 2. Goethite stalactites (left) and cross-section of an intergrowth of goethite stalactites (right). Mednорудянское deposit. Photo by M. B. Leibov.

Для цитирования: Попов В.А., Цыганко М.В. Ячейки Бенара – возможный механизм образования субаквальных и субфлюидных сталактитов Минералогия, 9(2), 70–75. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-3-5

For citation: Popov V.A., Tsyganko M.V. Benard Cells – a possible mechanism of the formation of subaquatic and subfluidic stalactites. Mineralogy, 9(2), 70–75. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-3-5

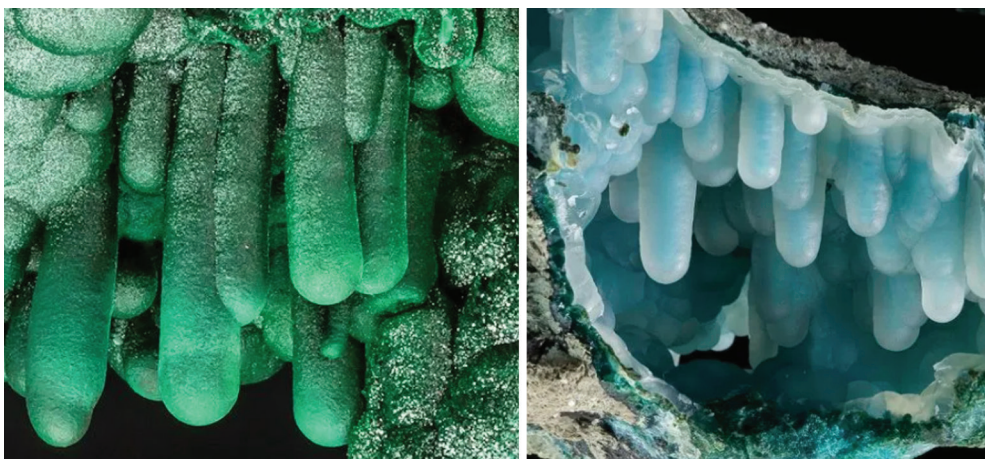


Рис. 3. Малахитовые (слева) и халцедоновые (справа), предположительно, субаквальные сталактиты, для кристаллизации которых необходимо искать причину конвективного движения в «питающем» растворе. Фото из открытых Интернет-источников. Размер сталактитов не указан.

Fig. 3. Malachite (left) and chalcedony (right) probably subaquatic stalactites, the reason of crystallization of which is probably related to the convective motion in the «feeding» solution. Photos from open Internet sources. The size of the stalactites is unknown.

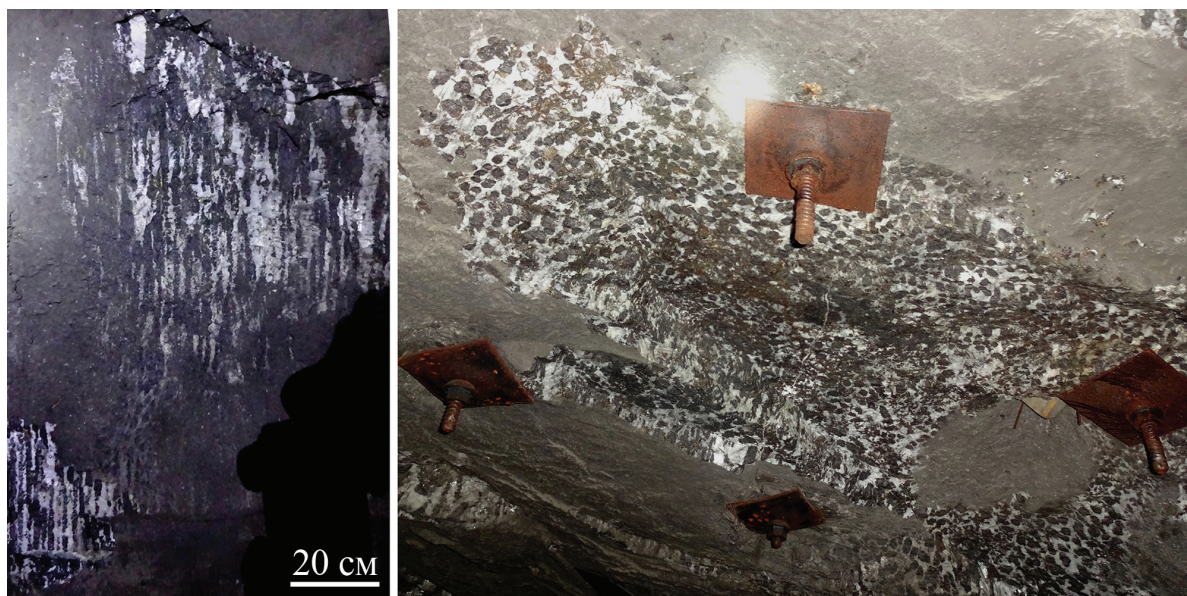


Рис. 4. Магнетитовые сталактиты в кальцитовом агрегате в горной выработке: слева – вертикальная стенка, справа – потолок с креплением.

Фото М. В. Цыганко.

Fig. 4. Magnetite stalactites in calcite aggregate in the mine: left – a vertical wall, right – ceiling with support.

Photo by M. V. Tsyganko.

деляет начало кристаллизации, а также порождает конвективное движение. Если на верхней поверхности полости есть некоторое количество таких капилляров, то возникают системы конвективных ячеек, длительная работа которых определяет сталактитовую текстуру минерального агрегата. По механизму возникновения конвективных ячеек в гравитационном поле Земли их можно отнести к

«ячейкам Бенара». Именно после опытов Бенара любые ячейки конвекции часто именуют ячейками Бенара (Эйдельман, 2000).

В природных объектах системы полостей с капиллярным окружением встречаются не только с водными растворами, которых много в верхней части земной коры. Жидкости в виде разных нефтей, разнообразных магм (расплавов-растворов) также



Рис. 5. Детали строения магнетитовых сталактитов: слева – редкие вросстки пирита (Py), халькопирита (Chp) и хлорита (Chl) в агрегате расщепленного магнетита сталактитов; справа – нижние части сталактитов в виде сростков расщепленных и блочных октаэдров магнетита.

Фото М.В. Цыганко и В.А. Попова.

Fig. 5. Details of the structure of magnetite stalactites: left – rare ingrowths of pyrite (Py), chalcopyrite (Chp) and chlorite (Chl) in aggregate of split magnetite stalactites; right – the lower parts of stalactites in form of aggregates of split and blocky octahedra of magnetite. Arrow – flow direction.

Photo by M.V. Tsyganko and V.A. Popov.

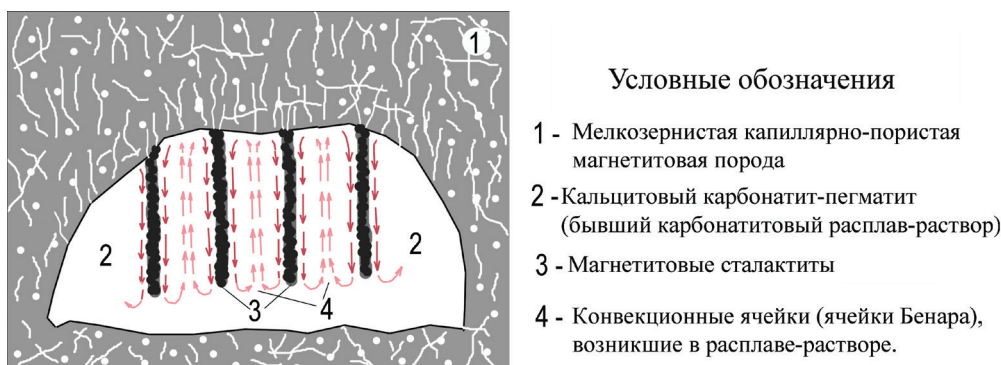


Рис. 6. Схематическая модель формирования магнетитовых сталактитов в полости карбонатито-скарновой системы.
 Fig. 6. Schematic model of the formation of magnetite stalactites in the cavity of the carbonatite-skarn system.

встречаются в капиллярно-пористых твердых телах с полостями. Следовало ожидать образование сталактитов не только в связи с водными системами. Так, давно фиксировались «странные» кварц-полевошпатовые сталактиты в полостях крупных жил гранитных пегматитов (Павлишин и др., 1988 – рис. 73). Недавно М.В. Цыганко обнаружил магнетитовые сталактиты в карбонатит-пегматитах Песчанского месторождения железных руд на Северном Урале. Этот объект требует более подробного повествования.

В 2019 г. на шахте «Северопесчанская» подготовительными выработками Ново-Южной залежи на отметке -295 м в орте 9 в породах лежачего бока рядом с нижней границей рудного (магнетитового) тела были вскрыты интереснейшие формы минера-

лизации. На значительном протяжении выработки (около 7–8 м) массив горной породы представлял собой множество вертикально расположенных параллельных «стержней» магнетита, пространство между которыми было заполнено крупнокристаллическим белым кальцитом (рис. 4, 5). Диаметр «стержней» магнетита был, в основном, выдержанным и составлял, в среднем, 1.0–1.5 см. Их максимальную длину установить не удалось, так как в местах, зачищенных от пыли, и в местах, где были сколоты выступающие части массива, длина видимой части «стержней» составляла 0.5 м и более, а «стержни» верхними концами прикреплялись к массиву магнетитовой мелкозернистой руды с большим количеством пор и миароловых полостей с кальцитом.



Рис. 7. Карбонатитовые тела (светлое) среди магнетитовых тел (темное) в уступе карьера Меднорудянского месторождения. 2013 год.

Фото В.А. Попова.

Fig. 7. Carbonatite bodies (light) among magnetite bodies (dark) in the ledge of the quarry of the Mednorudyansk deposit. 2013.

Photo by V.A. Popov.

Размер полости с магнетитовыми стержнями составлял первые метры. Выделения магнетита в виде строго вертикальных «стержней» были расположены в массиве очень плотно: расстояния между ними составляли в среднем несколько миллиметров, редко достигая первых сантиметров. Изредка эти «стержни» срастались между собой. В центральной части описываемого участка массива выделения магнетита были строго параллельны друг другу, что напоминало вид некоторых видов сталактитов в пещерах. В редких случаях под нижними окончаниями «стержней» наблюдались магнетитовые холмики, похожие на пещерные сталагмиты.

Магнетитовые сталактиты сложены кристаллами блочного тонкорасщепленного магнетита октаэдрического габитуса. Вследствие расщепления, издалека кристаллы магнетита кажутся округлыми. Изредка в агрегате магнетита встречаются мелкие, синхронные с магнетитом, вроски пирита, халькопирита, клинохлора, тремолита и геденбергита, что указывает на возможные достаточно высокие температуры кристаллизации карбонатит-пегматита (рис. 5). Поверхность на кристаллах магнетита идиоморфная по отношению к вмещающему крупнозернистому кальциту, что говорит о кристаллизации кальцита после окончания роста сталактитового магнетита.

Для построения модели формирования текстуры минерального агрегата важны следующие соображения: 1) минералообразование происходило в полости, возникшей в крупном теле мелкозернистого магнетита (см. схему на рис. 6); 2) полость и капиллярно-пористая система вокруг полости были заполнены карбонатитовым расплавом-раствором при температуре выше его температуры плавления; 3) в стационарном состоянии (некоторое время) в такой системе формируются конвективные потоки, связанные с разной плотностью растворов в капиллярах и в полости; 4) если в более плотных слоях потоков возникнет пересыщение по отношению к каким-либо минералам, может возникнуть кристаллическое тело, наследующее вертикальное движение потока в гравитационном поле.

Факт нахождения карбонатитового тела внутри тела плотных магнетитовых агрегатов (руд) на Песчанском месторождении не является большой редкостью для колонн тепломассопереноса земной коры. Например, в карьере Меднорудянского месторождения сульфидные и апатитсодержащие карбонатитовые тела находятся среди тел мелкозернистых магнетитовых агрегатов (рис. 7). Но условия для формирования сталактитов в глубинных высокотемпературных условиях, судя по публикациям, создаются редко. И все же они встречаются, что позволяет нам предположить существование **субфлюидных сталактитов** в дополнение к газовым и субаквальным.

Литература

- Максимович Г.А. (1963) Основы карстоведения, том 1. Пермь, Пермское книжное издательство, 444 с.
- Павлишин В.И., Юшкин Н.П., Попов В.А. (1988) Онтогенический метод в минералогии. Киев, Наукова думка, 120 с.
- Попов В.А., Попова В.И., Блинов И.А., Пономарев В.С. (2015) Минералы Меднорудянского месторождения (Средний Урал). *Минералогический Альманах*, 20(3), 128 с.
- Эйдельман Е.Д. (2000) Конвективные ячейки: три приближения теории опытов Бенара. *Соросовский образовательный журнал*, 6(5), 94–100.

References

- Eydelman E.D.** (2000) [Convective cells: three approximations of the theory of Benard experiments]. *Sorosovskiy obrazovatelny zhurnal [Soros Educational Journal]*, **6**(5), 94–100. (in Russian)
- Maksimovich G.A.** (1963) [Basics of karst studies, volume 1]. Perm, Permskoe knizhnoe izdatelstvo, 444 p. (in Russian)
- Pavlishin V.I., Yushkin N.P., Popov V.A.** (1988) [Ontogenic method in mineralogy]. Kiev, Naukova dumka, 120 p. (in Russian)
- Popov V.A., Popova V.I., Blinov I.A., Ponomarev V.S.** (2015) [Minerals of the Mednorudnyansk deposit (Middle Urals)]. *Mineralogicheskiy almanakh [Mineralogical Almanac]*, **20**(3), 128 p. (in Russian)