

В. Т. Хмурчик, Н. Г. Максимович, О. Ю. Мещерякова
Естественнонаучный институт Пермского государственного университета

МИКРООРГАНИЗМЫ, КАРСТ, НЕФТЬ И СПЕЛЕОГЕНЕЗ

V. T. Khmurchik, N. G. Maximovich, O. Yu Meshcheryakova

Natural Sciences Institute of Perm State University

MICROORGANISMS, KARST, OIL, SPELEOGENESIS

Summary

The main microbiological processes in karst caves and their influence on speleogenesis is described. The activation of aerobic and anaerobic microorganisms in oil-polluted karst rocks can enhance karst processes.

Микроорганизмы вездесущи, то есть они распространены повсеместно, где наличествуют условия для их существования. Факторами, лимитирующими развитие микроорганизмов в природе, являются температура, давление, влажность, наличие органических веществ и биогенных элементов, окислительно-восстановительные условия и соленость. Жизнедеятельность микроорганизмов и их участие в формировании и разрушении горных пород происходят в верхних слоях литосферы на ее границе с атмосферой и гидросферой. При этом в различных геологических районах, как и в различных горных породах, отличающихся по возрасту, литологическому, химическому или гранулометрическому составу, условия для жизнедеятельности микроорганизмов могут сильно различаться. Принимая, что для микроорганизмов предельной является температура около 100°C¹, в среднем граница биосферы может опускаться до глубины 4000 м (Покровский, 1961).

Водоносные горизонты и полости (в т.ч. пещеры) карстующихся пород представляют необходимые для существования микроорганизмов условия обитания. В районах развития закарстованных пород в случае их близкого залегания или выхода на поверхность происходит поглощение значительной части поверхностного стока.

Бактерии, археи и микроскопические грибы распространены в пещерах почти повсеместно. Микрофлора пещер не является уникальной по происхождению – это все те же микроорганизмы, обнаруживаемые на дневной поверхности, которые тем или иным способом, в то или иное время попали в пещеры и заселили их (Caumartin, 1963), чему могли способствовать несколько характерных особенностей карстовых водоносных горизонтов, вследствие которых эти горизонты более других подвержены загрязнению, в том числе и бактериальному, с поверхности. Согласно White (1988), такими особенностями являются: 1) очень тонкий почвенный слой на поверхности, который не обладает достаточной фильтрующей способностью; 2) отсутствие гранулярной структуры, что не обеспечивает достаточной механической фильтрации (самоочищения) внутри горизонта; 3) короткое время нахождения воды внутри горизонта, что не дает достаточного времени для биоочистки от химических загрязнителей. Более того, для карстовых водоносных горизонтов часто характерна прямая и быстрая связь с поверхностными и подземными водами; отложения в них подвижны и могут переноситься по карстовой системе, перенося тем самым и закрепленные на частицах отложений микроорганизмы (Mahler, Lynch, 1999; Mahler et al., 1999, 2000). Поэтому с точки зрения поиска новых видов микроорганизмов, уникальных

¹ Строго говоря, величина в 100°C не должна рассматриваться как абсолютная, поскольку для микроорганизмов более критичным является наличие в окружающей среде воды в жидкой фазе, а фазовое состояние воды связано не только с температурой, но и давлением: чем выше давление, тем выше температура точки кипения воды. Так, главным результатом общенаучного значения бурения Кольской сверхглубокой скважины СГ-3 явилось установление в условиях докембрийских кристаллических пород щита свободной воды на глубинах до 12 км (Иванов, Иванов, 2002), где температура была около 200°C (Кольская сверхглубокая, 1998). Поэтому не удивительно обнаружение микроорганизмов, жизнеспособных при температуре до 113°C в условиях давления, превышающего атмосферное (Blöchl et al., 1997). Существует мнение, что максимальная ростовая температура, при которой может существовать микробная жизнь, возможно, может быть найдена между 110°C и 150°C (Deming, Baross, 1993; Stetter et al., 1990).

именно для пещер, никаких открытий не предстоит – "пещерные" микроорганизмы являются представителями тех же родов и видов, уже известных нам по почвенной и водной микробиологии.

Карст сильно гетерогенен – различные гидрогеологические условия могут наблюдаться на расстоянии буквально нескольких метров друг от друга. Карстовые системы могут быстро откликаться на изменение климатических условий или условий окружающей среды. Качество воды в карсте может очень существенно меняться за короткий промежуток времени (Ryan, Meiman, 1996; Mahler, Lynch, 1999; Musgrove, Banner, 2004). Все эти изменения, несомненно, сказываются на жизнедеятельности микроорганизмов. С другой стороны, в зоне развития альпийского карста обнаружено существование автохтонного микробного эндокарстового сообщества, то есть сообщества, не зависящего от сезонных или гидрологических условий (Farnleitner et al., 2005).

Наличие множества разнообразных экологических ниш (даже в пределах одной карстовой системы) дает возможность существования в пещерах довольно разнообразной микрофлоры. Однако обнаружение в пещерах каждой данной группы микроорганизмов говорит лишь о ее возможной роли в геологическом процессе. Нельзя отождествлять присутствие микроорганизмов с наличием их активной жизнедеятельности (Кузнецов и др., 1962). Вопрос совсем не в том, какие бактерии здесь находятся, а в том, какие функции в данных реальных условиях они могут осуществлять (Бруевич, 1953). Еще в 1963 г. было отмечено, что невозможно составить исчерпывающе полный список микроорганизмов, обнаруживаемых в пещерах. Более того, даже будучи составленным, этот список не представлял бы большого научного интереса вследствие "поверхностного" происхождения пещерной микрофлоры (Caumartin, 1963). Следовательно, микробиологические исследования пещер должны быть сфокусированы не на микроорганизмах самих по себе, а только в связи с осуществляемыми ими процессами. Нужен не ботанический (описательный) подход, а физиологический или, с учетом замечаний (Бруевич, 1953; Кузнецов и др., 1962), физиолого-геохимический подход.

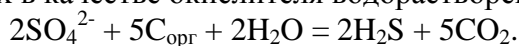
Роль микроорганизмов в пещерах

Роль микроорганизмов в пещерах может быть сведена к нескольким функциям: 1) преобразование и разрушение органических веществ (органотрофия); 2) синтез новых органических веществ (хемолитоавтотрофия); 3) преобразование горных пород, сопровождающееся разрушением минералов и/или минералоновообразованием. Первые две функции являются вполне самостоятельными, хотя их и можно рассматривать как две противоположенные ветви единого планетного цикла углерода. И если отталкиваться от цикла углерода, то третья функция будет сопутствовать первым двум.

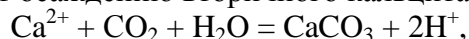
Органотрофия. Органические вещества в пещерах большей своей частью имеют поверхностное происхождение и поступают в пещеры извне. В разрушении этих веществ в пещерах ключевую роль, как и на поверхности, играют бактерии, актиномицеты и микроскопические грибы, численность которых в пещерах обычно ниже, чем в поверхностных экосистемах, что связывают с меньшим количеством доступных для микроорганизмов органических веществ. Преобразование и разрушение органических веществ может происходить не только в аэробных, но и анаэробных условиях. Продукты трансформации органического вещества имеют кислую природу (углекислота и органические кислоты) и могут оказывать влияние на процессы осаждения или растворения карбонатных пород. Экзометаболиты и органические вещества мортмассы органотрофных микроорганизмов могут растворять карбонатные породы пещер (Perry et al., 2004; Friis et al., 2003). С другой стороны, метаболическая активность органотрофных микроорганизмов может являться причиной образования различных спелеотем: пещерного попкорна (Thraillkill, 1964), сталактитов (Went, 1969), "pool fingers" (Davis, 2000), лунного молока (Davies, Moore, 1957; Caumartin, 1963; Cañaveras et al., 1999, 2006). Баланс между локальными условиями и микробиальными метаболическими процессами, которые доминируют при данных условиях,

определяет, какой процесс (осаждение или растворение карбонатов) будет протекать в данном месте (Pohl, Schneider, 2002; Vlasceanu et al., 2000).

Наши исследования нефтезагрязненных карстующихся пород в пределах Полазненского месторождения нефти (Максимович, Мещерякова, 2009) показали наличие в них активного нефтеокисляющего бактериального сообщества, а исследования подземных вод выявили наличие сульфатвосстанавливающих бактерий. Присутствие аэробного и анаэробного бактериальных сообществ в одном месте не является чем-то необычным. Наличие нефтяной линзы на поверхности подземных вод ухудшает их кислородный режим, препятствуя прямому поступлению кислорода из атмосферы. Исчерпание в подземных водах водорастворенного кислорода, который был в них до появления нефтяной линзы, а также поступающего из зоны питания подземных вод, в процессах бактериального (и химического) окисления как водорастворенного органического вещества, так и углеводородов нефти вызвало появление восстановительной обстановки в подземных водах, что привело к развитию в них анаэробных бактериальных процессов. В существующих условиях преимущественное развитие получили сульфатвосстанавливающие бактерии, использующие в метаболических процессах в качестве окислителя водорастворенные сульфат-ионы:



В качестве восстановителя эти бактерии могут использовать не только водорастворенное органическое вещество, но и углеводороды самой нефтяной линзы (Розанова, Кузнецов, 1974). Одним из продуктов процесса бактериальной сульфатредукции является сероводород. В процессе образования сероводорода по мере использования растворенных сульфат-ионов в раствор должны переходить новые их порции из сульфатсодержащих водовмещающих пород, при этом сульфатсодержащие минералы будут растворяться. Другим продуктом процесса бактериальной сульфатредукции является углекислый газ. Поступление его в подземные воды способствует осаждению вторичного кальцита:



что снижает насыщенность подземных вод ионами кальция и также способствует дополнительному растворению пород. Бактериальное восстановление сульфатов за счет нефтяных углеводородов сопровождается обогащением карстовых вод органическими кислотами (Кузнецов и др., 1962; Розанова, Кузнецов, 1974; Максимович, Быков, 1978), содержание которых, например, может достигать 7 г/л в условиях пластовых вод нефтяных месторождений (Быков, 2002). Бактериальное окисление углеводородов нефти в аэробных условиях также ведет к росту в воде содержания органических кислот, растворяющих карбонатные породы. В результате все вышеперечисленное ведет к усилению карстообразовательного процесса в нефтезагрязненных водовмещающих гипсоносных породах как в аэробной, так и анаэробной геохимических обстановках одновременно.

Хемолитоавтотрофия. Хемосинтетические процессы являются другим источником энергии для поддержания существования бактериальных сообществ. Физиологические механизмы, используемые микроорганизмами для извлечения энергии из химических соединений, довольно разнообразны. В зависимости от типов используемых химических соединений (точнее, осуществляемых химических превращений) выделяют отдельные физиологические группы микроорганизмов, среди которых в пещерах обнаруживаются: водородокисляющие, железоокисляющие, марганецокисляющие, сероокисляющие, аммонийокисляющие, метаноокисляющие, денитрифицирующие, железовосстанавливающие, сульфатвосстанавливающие, метанобразующие и ацетатобразующие микроорганизмы. Все они не нуждаются в органических веществах как источнике углерода для конструктивного метаболизма, а используют для этого CO_2 из окружающей среды, скорость хемоавтотрофной фиксации которого может быть довольно высокой. Так, для пещеры Cesspool Cave (США) была зафиксирована скорость хемоавтотрофной фиксации CO_2 30,4 нг С/(мг·час) (Engel et al., 2001). Доказано, что хемоавтотрофные виды микроорганизмов могут поддерживать жизнь животных в пещерах, в которые отсутствует поступление органических веществ извне. К таким пещерам, экосистемы которых основываются на

продукции хемолитоавтотрофных микроорганизмов, относятся: Movile Cave (Румыния), пещерные системы Frassassi (Италия), Gueva de Villa Luz и пещеры Юкатанского полуострова (Мексика), Lower Kane Cave и многочисленные пещеры Флориды (США) (Engel, 2005). Продукты жизнедеятельности хемолитоавтотрофных микроорганизмов имеют кислую природу (в основном это неорганические кислоты) и могут растворять карбонатные породы. Описание основных родов хемолитоавтотрофных микроорганизмов, обнаруженных в пещерах, а также осуществляемые ими химические реакции приведены в (Engel, 2005).

Преобразование горных пород. Микроорганизмы могут играть ключевую роль в преобразовании минералов и горных пород. Многие бактерии выделяют в окружающую среду органические кислоты, которые активно растворяют карбонаты. Жизнедеятельность хемолитоавтотрофных микроорганизмов, окисляющих аммиак и серу, приводит к закислению окружающей среды и растворению карбонатных пород. Растворению пород способствуют и органические вещества микробиологического происхождения: экзополисахариды (основной компонент бактериальных биопленок), сидерофоры и другие хелатообразующие соединения и даже клеточные стенки бактерий (Perry et al., 2004; Friis et al., 2003). С другой стороны, липиды и фосфолипиды бактерий ингибируют растворение пород. Хемолитоавтотрофные процессы вызывают снижение содержания CO_2 в окружающей среде, что благоприятствует осаждению карбоната кальция из растворов. Более того, клетки микроорганизмов могут выступать в роли центров осаждения и кристаллизации вещества (Barton, Northup, 2007).

Связь процессов преобразования горных пород с круговоротом углерода (органотрофными и хемолитоавтотрофными процессами) описана выше. Следует отметить, что в пещерах может существовать целая цепочка взаимосвязанных процессов, разрушающих одни породы и приводящих к образованию других. Ярким примером является пещера активного сернокислотного спелеогенеза Kane Cave (США), в которой по Bennett et al. (2004) обнаружены следующие микробиологические процессы. На дне пещеры, расположенной в известняках, разгружаются сероводородные источники. Сероокисляющие бактерии, образовавшие маты, окисляют сероводород в субаквальных и субаэральных условиях. Образующаяся в результате этого серная кислота разрушает известняк и вызывает отложение гипса, который покрывает стены и пол пещеры. Под матом сероокисляющих бактерий в анаэробной обстановке развиваются сульфатвосстанавливающие бактерии, продуцирующие сероводород и летучие органические соединения серы, которые также окисляются сероокисляющими бактериями. Авторы делают вывод, что как микробное потребление, так и микробное образование серосодержащих газов являются частью пещерообразующего процесса в пещерах кислотного спелеогенеза.

Таким образом, микрофлора пещер имеет происхождение от микрофлоры поверхностных экосистем и в подавляющем количестве случаев не представляет сама по себе исключительного научного интереса, а только в связи с протекающими в пещерах процессами; жизнедеятельность хемолитоавтотрофных микроорганизмов может обеспечивать существование всей остальной биоты пещер в условиях отсутствия поступления органических веществ извне; при исследовании процессов спелеогенеза необходимо учитывать роль микроорганизмов в них.

Известно, что техногенные процессы могут привести к развитию псевдокарста (Максимович, 1963; Дублянский, Дублянская, 2007), а также могут активизировать идущий процесс образования настоящего карста (Горбунова и др., 1992). Однако, насколько нам известно, никто до настоящего времени не рассматривал загрязнение нефтью (в нашем случае – процесс техногенного происхождения) как причину или запускающий механизм процесса биогенного карстообразования, который усиливает существующий абиогенный процесс. Развитие биогенного карстообразовательного процесса в анаэробной обстановке и активизация карста в сульфатизированных карбонатных породах были известны и ранее (Быков, 2002). Однако в описанном случае в качестве субстрата для жизнедеятельности бактериальных сообществ выступало автохтонное битуминозное вещество сланцев,

находящееся там по естественно-природным причинам, а не привнесенное в результате техногенеза вещество нефти, как в нашем случае. По большому счету не важно, каково происхождение нефтяного загрязнения: природное оно, техногенное или природно-техногенное. В любом случае попадание нефти в карстующиеся породы вызовет активизацию аэробной и анаэробной микрофлоры вод и пород и станет причиной биогенного карстообразовательного процесса. Таким образом, в районах развития карста работы по добыче, транспортировке и переработке нефти требуют особого внимания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бруевич С. В. Химия и биологическая продуктивность Черного моря. – Труды Ин-та океанол., т. VII. – М., Изд-во АН СССР, 1953.
2. Быков В. Н. Нефтегазовое карстование. – Пермь, Изд-во Пермского гос. ун-та, 2002. – 351 с.
3. Горбунова К. А., Андрейчук В. Н., Костарев В. П., Максимович Н. Г. Карст и пещеры Пермской области. – Пермь, Изд-во Пермского гос. ун-та, 1992. – 200 с.
4. Дублянский В. Н., Дублянская Г. Н. Карст мира. – Пермь, Изд-во Пермского гос. ун-та, 2007. – 331 с.
5. Иванов С. Н., Иванов К. С. Альтернативная общепринятой оценка результатов научного сверхглубокого бурения скважин Кольской СГ-3, немецкой КТБ и шведской Гравберг // В сб. "Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть и газ". Мат. межд. конф. памяти акад. П. Н. Кропоткина, 20-24 мая 2002 г., Москва – М., ГЕОС, 2002. – с. 134-135.
6. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований. – М., МФ "Технонефтегаз", 1998. – 260 с.
7. Кузнецов С. И., Иванов М. В., Ляликова Н. Н. Введение в геологическую микробиологию. – М., Изд-во АН СССР, 1962. – 239 с.
8. Максимович Г. А. Основы карстования. Т. 1. – Пермь, Пермское книжное изд-во, 1963.
9. Максимович Г. А., Быков В. Н. Карст карбонатных нефтегазоносных толщ. – Пермь, Изд-во Пермского гос. ун-та, 1978. – 96 с.
10. Максимович Н. Г., Мещерякова О. Ю. Методы борьбы с нефтяным загрязнением на закарстованных берегах водохранилищ // Экология урбанизированных территорий. – 2009. – № 4. – С. 55-58.
11. Покровский В. А. О нижней границе биосферы на территории Европейской части СССР, по данным региональных геотермических исследований. – Труды Ин-та микробиол. АН СССР. – Вып. 9. – Сб. "Геологическая деятельность микроорганизмов" – М., Изд-во АН СССР, 1961.
12. Розанова Е. П., Кузнецов С. И. Микрофлора нефтяных месторождений. – М., Наука, 1974. – 197 с.
13. Barton H. A., Northup D. E. Geomicrobiology in cave environments: past, current and future perspectives // Journal of Cave and Karst Studies, 2007, v. 69, no. 1, p. 163-178.
14. Bennett P. C., Engel A. S., Mabin K., Stern L. A. Sulfur gas dynamics in an aquatic cave ecosystem // Goldschmidt Conference Abstract, 2004, p. A383.
15. Blöchl E., Rachel R., Burggraf S., Hafenbradl D., Jannash H. W., Stetter K. O. *Pyrolobus fumarii*, gen. and sp. nov., represents a novel group of archaea, extending the upper temperature limit for life to 113°C // Extremophiles, 1997, v. 1, p. 14-21.
16. Cañaveras J. C., Guezva S., Sanchez-Moral S., Lario J., Laiz L., Gonzalez J. M., Saiz-Jimenez C. On the origin of fiber calcite crystals in moonmilk deposits // Naturwissenschaften, 2006, v. 93, p. 27-32.
17. Cañaveras J. C., Hoyos M., Sanchez-Moral S., Sanz-Rubio E., Bedoya J., Soler V., Groth I., Schumann P., Laiz L., Gonzalez I., Saiz-Jimenez C. Microbial communities associated with

hydromagnesite and needle-fiber aragonite deposits in a karstic cave (Altamira, Northern Spain) // *Geomicrobiology Journal*, 1999, v. 16, p. 9-25.

18. Caumartin V. Review of the microbiology of underground environments // *Bulletin of the National Speleological Society*, 1963, v. 25, p. 1-14.

19. Davies W. E., Moore G. W. Endellite and hydromagnesite from Carlsbad Caverns // *Bulletin of the National Speleological Society*, 1957, v. 19, p. 24-27.

20. Davis D.G. Extraordinary features of Lechuguilla Cave, Guadalupe Mountains, New Mexico // *Journal of Cave and Karst Studies*, 2000, v. 62, p. 147-157.

21. Deming J. D., Baross J. A. Deep-sea smokers: window to a subsurface biosphere? // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, v. 57, p. 3219-3230.

22. Engel A. S. Chemoautotrophy // In: "Encyclopedia of caves" – Culver D.C., White W.B. (eds.) – Elsevier Academic Press, 2005, p. 90-102.

23. Engel A. S., Porter M. L., Kinkle B. K., Kane T. C. Ecological assessment and geological significance of microbial communities from Cesspool Cave, Virginia // *Geomicrobiology Journal*, 2001, v. 18, p. 259-274.

24. Farnleitner A. H., Wilhartitz I., Ryzinska G., Kirschner A. K. T., Stadler H., Burtscher M. M., Hornek R., Szewzyk U., Herndl G., Mach R. L. Bacterial dynamics in spring water of alpine karst aquifers indicates the presence of stable autochthonous microbial endokarst communities // *Environmental Microbiology*, 2005, v. 7, no. 8, p. 1248-1259.

25. Friis A. K., Davis T. A., Figueira M. M., Paquette J., Mucca A. Influence of *Bacillus subtilis* cell walls and EDTA on calcite dissolution rates and crystal surface features // *Environmental Science and Technology*, 2003; v. 37, p. 2376-2382.

26. Mahler B. J., Lynch F. L. Muddy waters: temporal variation in sediment discharging from a karst spring // *Journal of Hydrology*, 1999, v. 214, p. 165-178.

27. Mahler B. J., Lynch F. L., Bennett P. C. Mobile sediment in an urbanizing karst aquifer: Implications for contaminant transport // *Environmental Geology*, 1999, v. 39, p. 25-38.

28. Mahler B.J., Personné J.-C., Lods G.F., Drogue C. Transport of free and particulate-associated bacteria in karst // *Journal of Hydrology*, 2000, v. 238, p. 179-193.

29. Musgrove M., Banner J.L. Controls on the spatial and temporal variability of vadose dripwater geochemistry: Edwards Aquifer, central Texas // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, v. 68, no. 5, p. 1007-1020.

30. Perry T. D., Duckworth O. W., McNamara C. J., Martin S. T. Mitchell R. Effects of the biologically produced polymer alginic acid on macroscopic and microscopic calcite dissolution rates // *Environmental Science and Technology*, 2004; v. 38, p. 3040-3046.

31. Pohl W., Schneider J. Impact of endolithic biofilms on carbonate rock surface // In: "Natural stone: weathering phenomena, conservation strategies and case studies" – Siegesmund S., Weiss T., Vollbrecht A. (eds.) – Geological Society London, 2002, p. 177-194.

32. Ryan M., Meiman J. An examination of short-term variations in water quality at a karst spring in Kentucky // *Ground Water*, 1996, v. 34, p. 23-30.

33. Stetter K. O., Fiala G., Huber G., Huber R., Seegerer A. Hyperthermophilic microorganisms // *FEMS Microbiology Review*, 1990, v. 75, no. 2-3, p. 117-124.

34. Thrailkill J. V. Origin of cave popcorn // *Bulletin of the National Speleological Society*, 1964, v. 27, p. 59.

35. Vlasceanu L., Sarbu S. M., Engel A. S., Kinkle B. K. Acidic cave-wall biofilms located in the Frasassi Gorge, Italy // *Geomicrobiology Journal*, 2000, v. 17, p. 125-139.

36. Went F. W. Fungi associated with stalactite growth // *Science*, 1969, v. 166, p. 385-386.

37. White W. B. *Geomorphology and hydrology of karst terrains.* – New York, Oxford University Press, 1988.