

**В. Андрейчук, А. Климчук, П. Бостон, Е. Галускин****Унікальні залізо-марганцеві колонії мікроорганізмів
в печері Золушка (Україна-Молдова)**

Андрейчук В., Климчук А., Бостон П., Галускин Е. Унікальні залізо-марганцеві колонії мікроорганізмів у печері Золушка (Україна-Молдова) // Спелеологія і карстологія, - №3. – Сімферополь. – 2009. С. – 5-25.

Резюме. В процесі розробки кар'єру та обумовленого відкачкою зниження рівня вод карстового водоносного горизонту в гіпсах (з 50-го року) стала доступною для безпосереднього вивчення велика печера Золушка (Попелюшка), у якій проходили суттєві геохімічні зміни середовища, що супроводжувалися формуванням специфічних відкладів, а також сплеском активності різноманітних мікроорганізмів. Серед останніх, одними з найбільш активних були різного роду залізобактерії. Наслідком життєдіяльності мікроорганізмів явилися чорно- та червоноколірні біохемогенні утворення – мікробіаліти (покриви, плівки, сталактити, сталагміти, кори, тощо), що покривають стіни та днища ходів печери. Серед мікробіалітів печери особливий інтерес представляють залізисті колоніальні утворення різної форми (сталагмітоподібні, трубчаті, кораловидні, натіковидні), сформовані ще незідентифікованими грибоподібними мікроорганізмами, які з високою вірогідністю є новими для науки. У статті описані форми їх колоніальних агрегатів, морфологія та хімічний склад мікроорганізмів, обговорені робочі гіпотези їх ідентифікації.

Ключові слова: печери, печера Золушка, геомікробіологія, мікробіологія печер, залізо-марганцеві відклади, колонії мікроорганізмів.

Андрейчук В., Климчук О., Бостон П., Галускин Е. Унікальні залізо-марганцеві колонії мікроорганізмів у печері Золушка (Україна-Молдова) // Спелеологія і карстологія, - №3. – Сімферополь. – 2009. С. – 5-25.

Резюме. У процесі розробки кар'єру та обумовленого відкачкою зниження рівня вод карстового водоносного горизонту в гіпсах (з 50-го року), стала доступною для безпосереднього вивчення велика печера Золушка (Попелюшка), у якій проходили суттєві геохімічні зміни середовища, що супроводжувалися формуванням специфічних відкладів, а також сплеском активності різноманітних мікроорганізмів. Серед останніх, одними з найбільш активних були різного роду залізобактерії. Наслідком життєдіяльності мікроорганізмів явилися чорно- та червоноколірні біохемогенні утворення – мікробіаліти (покриви, плівки, сталактити, сталагміти, кори, тощо), що покривають стіни та днища ходів печери. Серед мікробіалітів печери особливий інтерес представляють залізисті колоніальні утворення різної форми (сталагмітоподібні, трубчаті, кораловидні, натіковидні), сформовані ще незідентифікованими грибоподібними мікроорганізмами, які з високою вірогідністю є новими для науки. У статті описані форми їх колоніальних агрегатів, морфологія та хімічний склад мікроорганізмів, обговорені робочі гіпотези їх ідентифікації.

Ключові слова: печери, печера Золушка, геомікробіологія, мікробіологія печер, залізо-марганцеві відклади, колонії мікроорганізмів.

Andreychouk V., Klimchouk A., Boston P., Galuskin E. Unique iron-manganese colonies of microorganisms in Zoloushka Cave (Ukraine-Moldova) // Speleology and Karstology, - №3. – Simferopol. – 2009. – P. – 5-25.

Abstract. During open-pit quarrying and related lowering of groundwater level in the gypsum karst aquifer (since 1950), large cave Zoloushka became accessible for direct exploration, in which considerable geochemical transformations of environment occurred, accompanied by the formation of specific deposits, as well as by burst of microbial activity. Among microorganisms, some of the most active were various iron bacteria. Microbial activity has resulted in precipitation of black and red biochemical formations – microbialites (coatings, crusts, films, stalactites, stalagmites, etc.), which cover walls and floors of cave passages. Most interesting among the microbialites are iron-rich colonial formations of various shapes (stalagmite-like, tube-like, coral-like, etc.) formed by yet unidentified fungi-like microorganisms which likely are new to science. In this paper, we characterize occurrence and morphology of the colonial aggregates, morphology and chemical composition of microorganisms and develop working hypotheses of their identification.

Key words: caves, Zoloushka Cave, geomicrobiology, cave microbiology, iron-manganese deposits, microbialites, colonies of microorganisms.

ВВЕДЕНИЕ

Пещера Золушка относится к интереснейшим с научной точки зрения спелеологическим объектам. Несмотря на сравнительно непродолжительную историю исследований (пещера открыта в 1976 году), пещере уже посвящены десятки научных статей, а также обобщающая монография (Андрейчук, 2007). Золушка является третьей по общей длине закартированных ходов пещерой мира (92 км), исследование которой продолжается и преподносит все новые и новые научные сюрпризы и загадки.

Связано это, в значительной степени, с тем, что пещерный лабиринт был вскрыт искусственно гипсовым карьером на рубеже 40-х и 50-х годов XX столетия. Вскрытие гипсовой толщи и углубление карьера сопровождалось откачкой подземных вод, что привело к существенному (около 20 м) понижению уровня карстовых вод и осушению пещеры. Снижение уровня карстовых вод в гипсах происходило постепенно и этапно, но в масштабе геологического времени – очень быстро, провоцируя разнообразные переходные процессы в самой пещере и окружающей среде. Пещера Золушка и ее район, таким образом, оказались своеобразным полигоном для изучения процессов раскрытия и дренирования закарстованного водоносного комплекса, которые в естественных условиях проходят на протяжении десятков тысяч лет. Одним из наиболее ярких переходных процессов были геохимические трансформации в водоносном комплексе, следствием которых явилось массовое осаждение (сброс) из окисляющихся подземных вод гидрооксидов железа и марганца. Количество свежих железо-марганцевых осадков исчисляется в пещере тоннами. Они делают пещеру Золушку разноцветной: неотъемлемым элементом пещерного пейзажа являются красный, желтый и черный цвета. Эти цвета придают пещере, а также исследующим ее спелеологам, характерный облик, ассоциирующийся с Золушкой из сказки Шарля Перро.

Минералогическое изучение железо-марганцевых осадков пещеры (Волков и др.,; Волков, Смирнов, Янчук, 1987; Волков, 1990, Андрейчук, 2007) показало, что в их осаждении существенная роль должна принадлежать микроорганизмам, прежде всего, разным группам железистых бактерий. Предварительные микробиологические исследования подтвердили эти предположения и позволили установить видовой состав и относительную химическую активность бактерий на современном этапе деградации водоносного горизонта, а также выяснить в общих чертах их геохимическую роль в формировании особенностей пещерной среды (Andreychouk, Klimchouk, 2001; Андрейчук, 2007).

В процессе микробиологических исследований было также установлено, что среди микроорганизмов часто встречаются более крупные, которые до сих пор не определены как таковые и не изучены с микробиологической точки зрения. Они получили название «неидентифицированных грибоподобных микроорганизмов» (Волков, 1990; Andreychouk, Klimchouk, 2001; Андрейчук, 2007). Со временем оказалось, что микроорганизмы эти имеют в пещере весьма широкое распространение и даже образуют

своеобразные железистые колониальные постройки. Их и посвящена настоящая статья.

РЕГИОНАЛЬНЫЕ И ЛОКАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ СПЕЛЕОГЕНЕЗА

В пределах Западной Украины, главным образом вдоль юго-западной окраины Восточно-Европейской платформы, располагается один из крупнейших в мире районов гипсового карста (рис. 1), получивший международную известность благодаря развитию тут крупнейших в мире лабиринтовых пещер, а также ввиду своего типологического значения как эталонного примера гипогенного (артезианского) спелеогенеза и региональной эволюции платформенного карстового водоносного комплекса от гидрогеологически закрытых условий к раскрытым (Климчук, 1999, 2006; Климчук, Андрейчук, Турчинов, 1995; Klimchouk, 2000, 2007). Закарстованию тут подвержены среднебаденские гипсы, перекрытые ратынскими известняками и карбонатно-глинистой толщей средне- и позднемиоценового возраста. Карстовые системы гипогенного происхождения перешли в реликтовое состояние в большей части территории в глубине платформенной окраины в результате дифференцированных плиоцен-четвертичных поднятий и раскрытия водонапорной системы глубоко врезанными долинами Днестра и его левых притоков. В зоне сочленения платформы с Предкарпатским прогибом гипсовая толща залегает преимущественно ниже современных эрозионных врезов, в связи с чем тут сохраняются условия напорного водоносного комплекса и продолжается гипогенный спелеогенез за счет восходящего перетока и разгрузки через гипсы вод регионального подгипсового водоносного горизонта (зона IV на рис. 1). В Буковинской части этой зоны имеются отдельные ареалы в пределах отдельных приподнятых тектонических блоков, где долина Прута частично вскрыла и сдренировала гипсы на дотехногенном этапе.

Пещера Золушка располагается на юге Западной Украины (Северная Буковина), в месте, где сходятся границы Украины, Молдовы и Румынии. Карьер с входом в пещеру расположен на территории Республики Молдова, в 50 - 200 м от границы с Украиной (Черновицкая область). Пещерный лабиринт (рис. 2) вытянут от входа в северо-западном (в сторону Украины) и северо-восточном (в сторону Молдовы) направлениях. Граница между Украиной и Молдовой, проходящая над лабиринтом, делит его на две примерно равные части: северо-западную - украинскую и юго-восточную - молдавскую. От Румынии пещерный лабиринт отделен пограничной рекой Прут, протекающей в 1-1,5 км южнее.

Среднебаденские гипсы на участке пещеры имеют мощность 23-25 метров и перекрыты слоем плотных хемогенных известняков мощностью 0,5-1,0 м (ратынский известняк). Несмотря на свою незначительную мощность, слой известняков сыграл важную роль в морфогенезе пещеры и сохранении полостей от заполнения покровными отложениями. На всей площади лабиринта среднебаденские эвапоритовые породы перекрыты карбонатно-

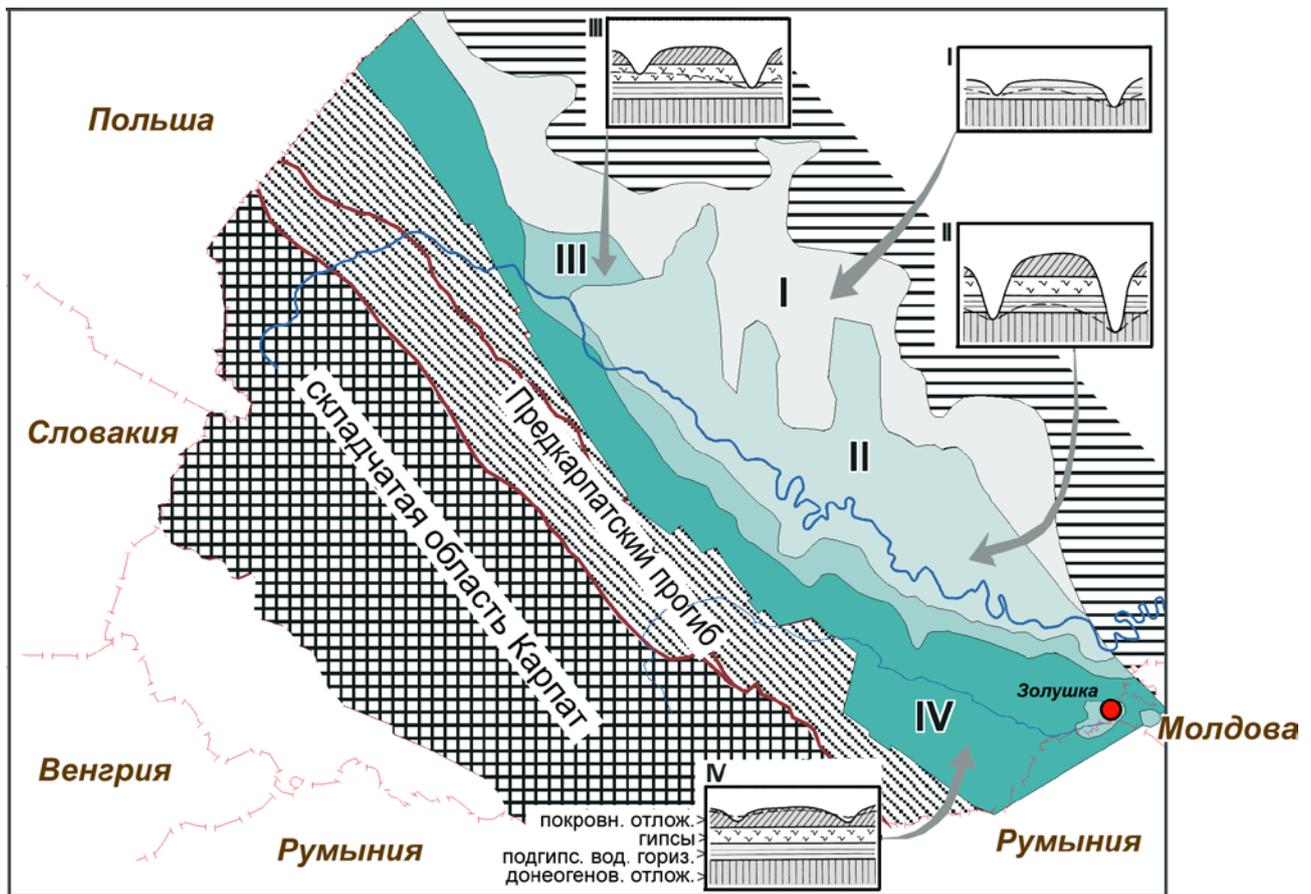


Рис. 1. Распространение и эволюционная зональность гипсового карста Западной Украины. I-IV = зоны различных типов карста: I = гипсовая толща полностью денудирована, подгипсовые карбонатные отложения выведены под четвертичный покров; II = взрезанный карст – гипсовая толща расчленена и сдренирована эрозионными врезам; III = приоткрытый карст – гипсовая толща частично и локально вскрыта эрозионными врезам и частично обводнена; IV = закрытый карст – гипсовая толща повсеместно залегает под покровом более молодых осадков и полностью обводнена (условия напорного водоносного комплекса). Расположение пещеры Золушка показано красным кружком.

глинистыми отложениями верхнего бадения. Мощность покровной толщи на участке пещеры изменяется, в зависимости от характера рельефа, от 10 до 60 м. В ее составе преобладают слоистые голубовато-серые аргиллитоподобные глины. На поверхности глин залегают отложения четвертичной системы, представлены аллювием III и IV террас р. Прут. Террасы имеют двухчленное строение и образованы русловой (песчано-гравийные смеси) и пойменной (желтовато-палевые суглинки) фациями с несколькими горизонтами ископаемых почв.

Гипсы залегают на маломощной (3-4 м) толще мергелей нижнего бадения, стратиграфически несогласно покрывающих размытую поверхность меловых (сеноманских) известняков и кварцево-глауконитовых песчаников. Отложения сеномана несогласно залегают на глинисто-карбонатных породах силура. Гипсы, подгипсовые и четвертичные отложения в разной степени обводнены. Подземные воды в гипсах и залегающих ниже карбонатно-песчаниковых породах нижнего бадения и верхнего мела гидравлически связаны и образуют единый баден-сеноманский водоносный комплекс. Воды комплекса имеют в районе пещеры повсеместное распространение. Их разгрузка осуществляется в русловые отложения р. Прут. На участке пещеры поверхность водоносного горизонта

деформирована депрессионной воронкой радиусом 3-7 км, сформированной водоотливом из карьера. Поэтому, большая часть гипсов здесь обезвожена. Водоносный горизонт в четвертичных отложениях подвешен на 10-54-метровой толще слабопроницаемых глин. Горизонт дренируется понижениями в рельефе. Для него характерно также скрытое подземное дренирование - проникновение воды вниз по провальным трубам над пещерными пустотами.

Пещера Золушка представляет собой горизонтальный лабиринт гипогенного происхождения, состоящий из сети ходов разной плотности и размеров (рис. 2). Морфолого-морфометрическая неоднородность пещеры обусловлена, как тектоническими, так и гидродинамическими (спелеогенетическими) причинами (Андрейчук, 2007). Наиболее крупные пустоты располагаются в верхней части разреза гипсов. Здесь развиты широкие (1,0-6,0 м) галереи, высотой 1,0-7,0 м с овальным, ромбовидным или полусферическим сечением. Ширина и высота ходов изменяются по районам. В пещере имеется несколько крупных залов - Динозавра, Античный, Черновицких спелеологов. Их длина достигает 100-170 м, объем 15000-30000 м³. Средний ярус ходов сообщается с верхним. Он состоит из коридоров, щелей и трещин, шириной 0,3-5,0 м, высотой 3-10 м. Верхний и средний

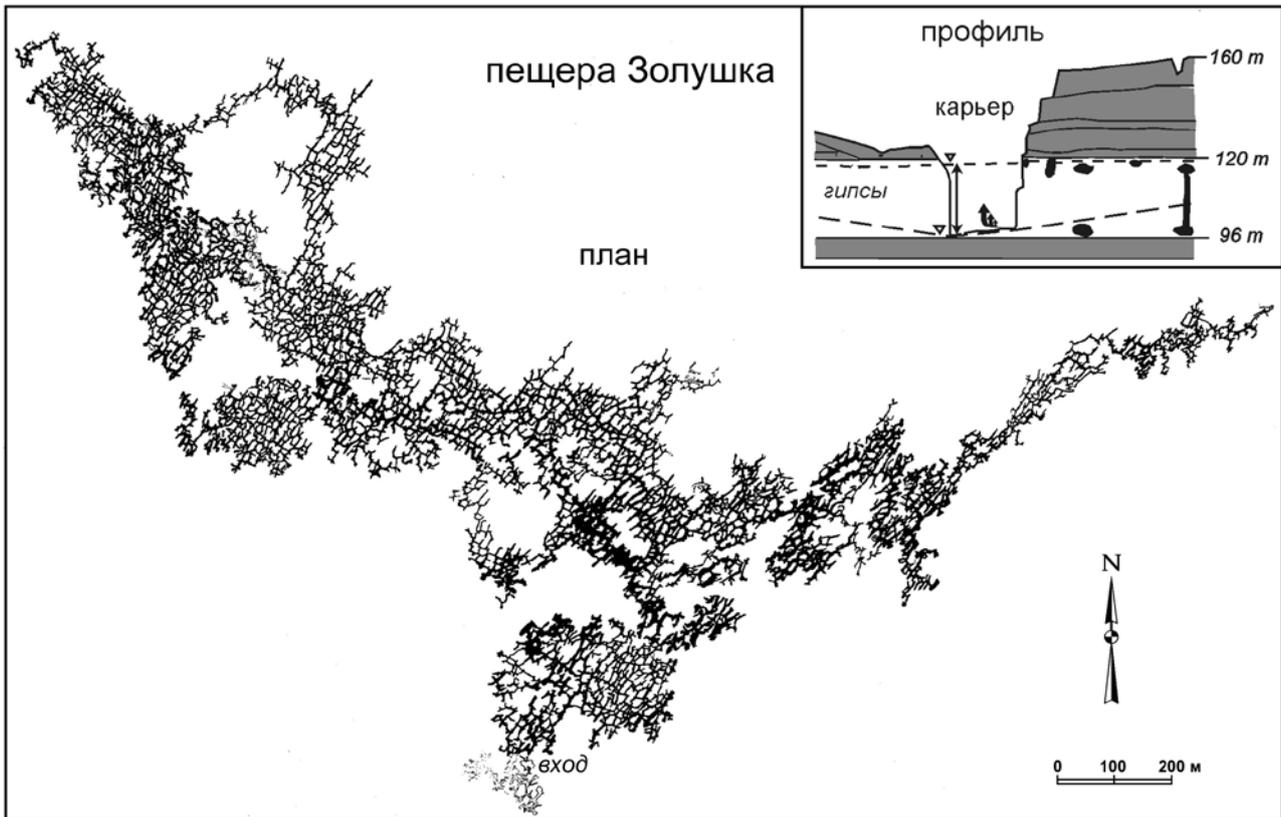


Рис. 2. План и условия заложения (схематический профиль во врезке) пещеры Золушка. Съемка Черновицкого спелеоклуба.

ярусы часто образуют в разрезе «замочную скважину». Для спелеологов, находящихся на верхнем ярусе, ходы второго яруса представляются в виде глубоких щелей, каньонов и колодцев в днищах ходов. Самый нижний ярус ходов образован по контакту гипсов с известняками. Он заполнен глинами, водой и исследован фрагментарно.

До заложения карьера гипсовый слой был большей частью обводнен. Уровень карстовых вод располагался в 2-3 м от его кровли. Подземные воды медленно двигались в направлении долины р.Прут и разгружались в ее русловые отложения. В дотехногенный период воды гипсов характеризовались (при разведке месторождения) существенным (свыше 100 мг/л) содержанием сероводорода и высокой минерализацией (3.0-4.5 г/л). Карьер стал искусственной дренажной карстовых вод и новым локальным базисом карстования. Вследствие постоянного водоотбора из карьера формировалась и развивалась депрессионная воронка, активизировался водообмен, снижалась минерализация вод (до 1,9 – 2,6 г/л) и происходила их дегазация.

В результате искусственного понижения уровня вод, гидравлически единая система (водоносный горизонт) начала распадаться на отдельные звенья - деградирующие микробассейны, разобщенные глинистыми накоплениями, а затем - на отдельные водоемы и озера - с относительно автономным режимом. В настоящее время в пещере насчитывается около 50 небольших водоемов и обводненных участков. Часть из них являются подвешенными на

слабопроницаемых пещерных илах. Другая часть обнаруживает разную степень, связи с современным депрессированным уровнем карстовых вод. Их режим определяется, главным образом, режимом откачки вод. Некоторые осложнения в режим колебаний и гидрохимию водоемов вносят периодические прорывы и очаговое поступление слабоминерализованных вскрышных вод - из четвертичного водоносного горизонта.

Замедленный режим водообмена и присутствие H_2S определяли однозначно восстановительный характер геохимических условий в подземных водах до вскрытия горизонта карьером, способствующий нахождению элементов, например, Fe и Mn, в растворенном, миграционно активном состоянии. Разрушение месторождения, а затем его вскрытие, открыли доступ к подземным водам кислорода, и положили начало цепочке интереснейших геохимических (а также минералогических, геохимических, микроклиматических и т.д.) изменений в пещерной среде, обусловленных этапной трансформацией среды от восстановительной через глеевую к окислительной.

По мере вскрытия гипсовой толщи карьером и перехода полостей в субэпиральные условия в них начал формироваться свой микроклимат. На большей части пещеры параметры подземной атмосферы (температура, влажность, давление воздуха) приобрели устойчивый, не подверженный сезонным колебаниям, характер. В привходовой части лабиринта (30-60 м от входа) сформировалась зона с неустойчивым микроклиматом, реагирующим на изменения состояния

наружной метеосреды. В стабильной части лабиринта температура воздуха установилась в пределах 10,2-11,6 °С, воды в подземных озерах - 11,0-11,5°С, а влажность воздуха - 100%. Особенность воздухообмена пещеры с наружной атмосферой - его замедленный характер. Застойный режим воздуха предопределен наличием всего одного входа. В настоящее время пещера соединяется с поверхностью лишь одним отверстием – глубоким (более 30 метров) бетонным колодцем, сооруженным над бывшим входом в стенке карьера, и окруженным массой отвальных пород. Важной особенностью микроклимата пещеры является высокое содержание в пещерном воздухе углекислого газа (1-5%), который генерируется процессами окисления рассеянного метана в нижележащей части водоносного комплекса, на что указывает изотопно-облегченный состав углерода ($\delta^{13}\text{C}$ от - 32 до 42 ‰ PDB) в составе CO_2 пещерного воздуха (Klimchouk, Yablokova, 1990; Klimchouk, Yablokova, Ol'shytynsky, 1984). Процессы окисления метана и микробной сульфатредукции интенсивно происходили до раскрытия водоносного комплекса и в настоящее время затухают.

Среди отложений пещеры преобладают голубовато-серые пластичные тонкослоистые глины, представляющие собой переотложенный в водной среде обвалный материал надпещерных глин. Их мощность колеблется в пещере от 0,5 до 6,0 и более метров. В разной степени заполняя ходы и галереи, они маскируют их истинный облик и размеры. В некоторых залах и ходах встречаются глыбы гипсов и известняков, обвалившиеся с потолка, а также крупные сравнительно свежие осыпи из рыхлых надпещерных отложений.

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ПЕЩЕРЕ

В середине 80-х годов в пещере осуществлен цикл специальных микробиологических исследований, преследовавших своей целью установление спектра микроорганизмов и выяснение их возможной геохимической роли в формировании широко развитых в пещере железо-марганцевых образований. Были отобраны пробы вещества из большинства пещерных сред (воды подземных озер, остаточные суглинки, глинистые отложения и железо-марганцевые осадки), а также с поверхностей их раздела – донных отложений на контакте глина-вода, поверхностного слоя глин на контакте с подземной атмосферой, поверхности воды подземных озер, гипсовых стен пещеры.

Исследования позволили установить, что пещера и ее разные среды отличаются обилием различных микроорганизмов (Andreychouk, Klimchouk, 2001). Среди них присутствуют бактерии, характерные для подземных вод комплекса в целом, а также их некоторые специфические разновидности. Наиболее благоприятными для развития бактерий являются в пещере контактные среды: поверхность глинистых пещерных отложений, гипсовые стены, особенно покрытые влажной глинистой пленкой, приповерхностный слой (пленка) воды пещерных водоемов и придонный слой воды вместе с донными отложениями (рис. 3). Значительное количество микроорганизмов содержится также во влажных пещерных глинах, карбонатно-суглинистых отложениях, а также в широко распространенных в пещере железо-марганцевых осадках и агрегатах.

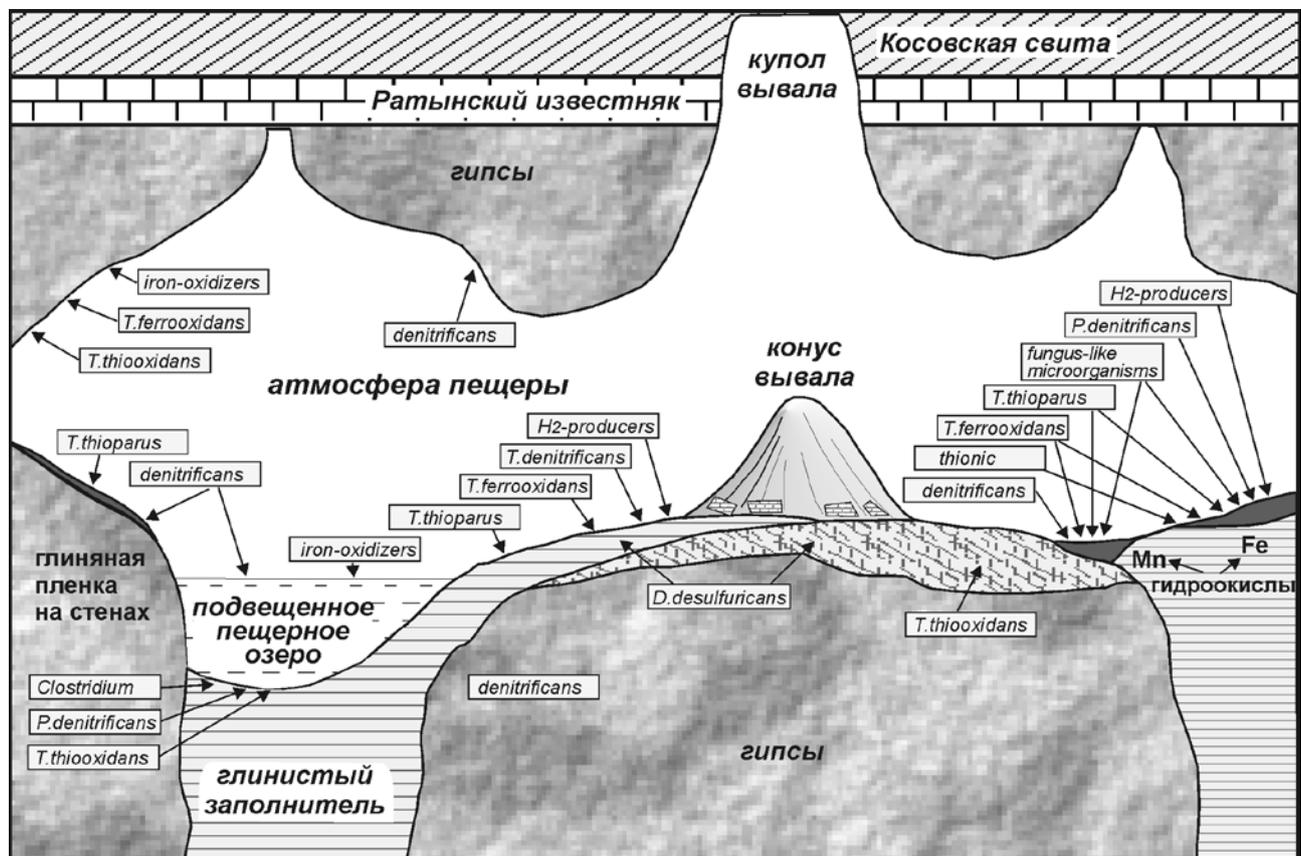


Рис. 3. Распределение основных типов микроорганизмов в подземной среде пещеры (по Andreychouk, Klimchouk, 2001).

Предварительные исследования позволили установить широкое развитие в пещере (в современных техногенных условиях) шести групп микроорганизмов: сульфатвосстанавливающих (*D. desulfuricans*), денитрифицирующих (*P. denitrificans*), водородпродуцирующих (*Clostridium*), тионовых (*T. ferrooxidans*, *T. thiooxidans*, *T. thioparus*, *T. denitrificans*), железобактерий и неидентифицированных грибообразных организмов, которые мы относим к специфическим.

В пещерных глинах наиболее многочисленны и активны сульфатвосстанавливающие (*Desulfovibrio desulfuricans*) и денитрифицирующие (*Pseudomonas denitrificans*) бактерии. Последние очень активны также в скоплениях гидроксидов железа и марганца, а также в глинистых донных отложениях пещерных озер. В отмеченных средах присутствуют также, хотя и менее активны, водородпродуцирующие бактерии.

Видовым разнообразием населяющих микроорганизмов отличаются голые и покрытые глинистой пленкой поверхности гипсовых стен пещеры. Здесь весьма активны тионовые и железобактерии, в меньшей мере - денитрифицирующие организмы. На поверхности воды с кальцитовый пленкой активностью отличаются железобактерии, а на поверхности пещерных глин на полу пещеры – железоокисляющие бактерии (*Thiobacillus ferrooxidans*).

Исключительно богатой средой с широким видовым спектром и высокой химической активностью микроорганизмов являются железо-марганцевые образования. В них присутствуют практически все выявленные в пещере виды микробов (за исключением сульфатвосстанавливающих). Особенно активны в них железобактерии, а также неидентифицированные грибообразные микроорганизмы, присутствующие в осадках в огромном количестве. Наименее освоены микроорганизмами карбонатно-суглинистые отложения, залегающие под серыми пещерными глинами.

Микробиологические исследования позволили установить следующие общие закономерности распространения микроорганизмов в пещере:

1. *Широкое развитие сульфатвосстанавливающих и денитрифицирующих бактерий в средах, обогащенных органическим веществом.* Исследования показали, что пещерные отложения, в особенности пещерные глины, содержат повышенное, примерно в 2 раза в сравнении с перекрывающими глинами, количество органических веществ. Содержится органика также в железо-марганцевых образованиях, особенно в скоплениях бернессита. Связь денитрифицирующих и сульфатвосстанавливающих микроорганизмов с отмеченными типами отложений объясняется тем, что органический материал, присутствующий в них, является для отмеченных бактериальных групп (как и для присутствующих в них водородпродуцирующих бактерий) источником энергии и углерода. Соответственно, слабое присутствие сульфатвосстанавливающих и отсутствие денитрифицирующих и водород-продуцирующих бактерий в карбонатно-суглинистых отложениях определяется незначительным содержанием в них органики ввиду их остаточного (от растворения гипсов) происхождения.

2. *Широкое развитие и высокая активность железобактерий и тионовых железоокисляющих бактерий T. ferrooxidans на всех пещерных поверхностях: отложениях, стенах пещеры и на поверхности водоемов.*

Анализ распространения в пещере микроорганизмов и их геохимической активности показал, что бактериальная жизнедеятельность в пещере предопределяет ряд специфических особенностей и явлений, касающихся минералообразования, формирования отложений и газового состава воздуха пещеры. Этим вопросам была посвящена отдельная публикация (Andreychouk, Klimchouk, 2001). В ней однако, не затрагивались вопросы, связанные с грибообразными микроорганизмами в железо-марганцевых отложениях.

ЖЕЛЕЗИСТЫЕ КОЛОНИИ ГРИБООБРАЗНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ

Как уже упоминалось, грибоподобные микроорганизмы формируют крупные и морфологически своеобразные колониальные образования (рис. 4), которые можно отнести к *микробиалитам* – органо-минеральным отложениям, образованным с ведущим участием микроорганизмов. Первой из обнаруженных форм были пустотелые трубчатые «сталагмиты», выявленные на одном из участков района Голландский Сыр. Участков с трубчатыми железистыми образованиями было в пещере, по-видимому, достаточно много. В начале изучения пещеры (70-е годы) спелеологи часто выносили фрагменты железистых трубок на поверхность, демонстрируя их как диковинку, а затем выбрасывали, не отдавая себе отчета в научной ценности этих образований. Поскольку первыми из выявленных форм были сталагмитоподобные образования, было предложено несколько гипотез их образования (Андрейчук, Волков, 1988; см. обзор в Андрейчук, 2007), которые не подтвердились последующими наблюдениями. Всего в пещере было выявлено три участка со сталагмитами, один из которых (с группой сталагмитов – 4 шт.) располагается в районе Голландский Сыр, и два (с единичными образованиями) – в районе Метрополитен. Причем один из выявленных в районе Метрополитен экземпляров имел необычный, «кактусоподобный» или «кораллоподобный» вид.

Начиная с 2005 года, когда после почти десятилетнего перерыва, пещера вновь стала доступной для спелеологов, было обнаружено еще несколько участков с колониями¹, но на этот раз – на сводах (переходный район Подвалов). Кроме того, в пещере имеется несколько десятков участков, где колониальные постройки могли быть разрушены (спелеологами или от усыхания). На это указывают значительные скопления железистых осадков («бугры»), наличие характерных корочек, а также их микроскопическое изучение, подтверждающее наличие грибоподобных микроорганизмов. К сегодняшнему дню в пещере выявлено около десятка значительных

¹ Новые колонии обнаружены молдавскими спелеологами под руководством И.Телешмана.

колониальных образований разной формы, а также десятки мест, где эти формы разрушены или представлены слоисто-корочными образованиями.

Локализация и морфология железистых колоний

Таким образом, по характеру локализации колониальные постройки можно подразделить на *донные* образования (на полу пещеры; рис. 4) и на *потолочные* (на сводах; рис. 5). Среди первых морфологически выделяются «*сталагмиты*», «*кораллы*» и *волнистые корки* на поверхности железистых скоплений, среди вторых – неправильной формы *покровные* и сложной формы *сталактитоподобные* образования. Некоторые из потолочных образований напоминают

по форме крупные осиные гнезда. *Сталагмиты* имеют форму пустотелых трубок изменяющегося диаметра и достигают в диаметре 2-20 см. Высота сталагмитов достигает 0,1-0,5 м. Толщина их стенок составляет 0,5-2,0 см. В поперечном сечении стенок отчетливо проявляется слоисто-зональное строение. Наблюдается суживание трубок к вершине – вплоть до полного смыкания стенок в свод. Некоторые трубки вообще не имеют отверстий наружу (рис. 4-1). Наибольший из обнаруженных до сих пор сталагмитов имеет высоту 0,4 (рис. 4-2). Диаметр его внутреннего отверстия колеблется в пределах 10-15 см. Прочие обнаруженные сталагмиты меньше: высота до 0,2 м, диаметр – 2,7 см (рис. 4-3).

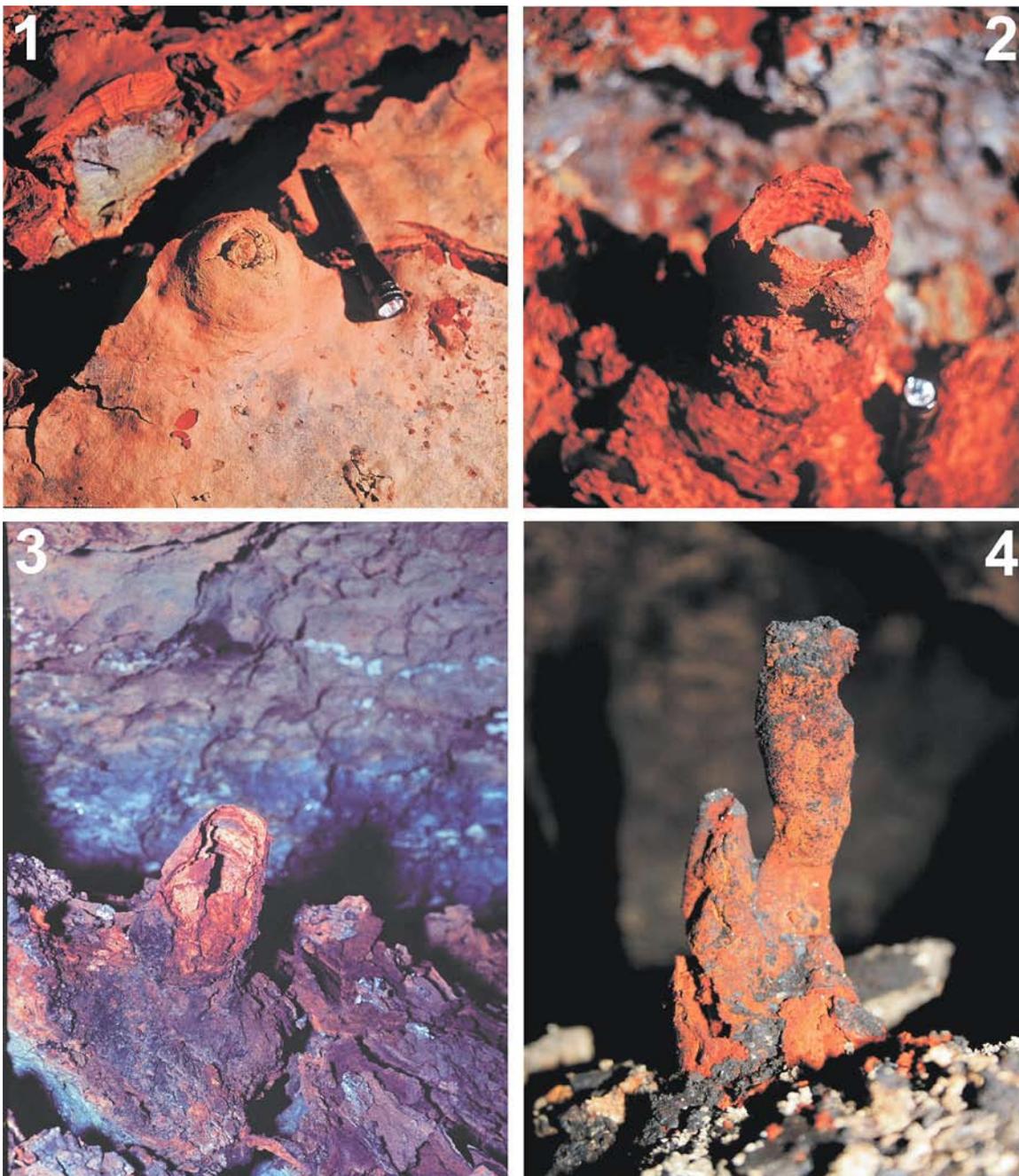


Рис. 4. Наземные (на полу пещеры) колонии железо-марганцевых микроорганизмов: 1-3 = пустотелые сталагмиты: 1 = с замкнутым верхом, 2,3 = открытые, 4 = кораллоподобный сталагмит.

В большинстве случаев, сталагмиты ориентированы вертикально, но могут быть и слегка наклонены (усыхание подложки?). Как правило, основание сталагмитов покоится на корках, образующих с ними единое целое. Состоят сталагмиты, главным образом, из гидроксидов железа, но их отдельные части и микрослойки иногда обогащены также гидроксидами марганца. Как уже упоминалось, к сожалению, большая часть форм данного типа, скорее всего, уничтожена. На сегодня их осталось 5 штук, большинство в районе Голландский Сыр.

Кораллоподобные формы (пока в единственном экземпляре) обнаружены в центральной части пещеры (район Метрополитен). Это образование, высотой около 15 см, с несколькими вертикальными «ветками» (рис. 4-4). Толщина веток 1-2 см. По-видимому, внутри они также пустотелые.

Волнистые покровные образования встречаются в разных районах пещеры – не только западных (Голландский Сыр, Геохимический, Буковина), но и в центральных (Центральный, Метрополитен, Майский, Перспектив) и даже – на востоке, где железо-марганцевых осадков меньше. Покровы имеют толщину 0,5-4,0 см и более. При отрывании от подложки они сохраняют свою форму, но легко разламываются в руках. Как правило, верхнюю часть железо-марганцевых скоплений образуют корки, а под ними располагается рыхлая масса осадка.

Потолочные колониальные образования своей формой напоминают *сталактитовые «гроздьи»* (рис. 5-1) или неправильной формы *осиные гнезда* (рис. 5-2). Как первые, так и вторые внутри пустотелые (трубчатые). Их стенки представляют собой многослойные корки, состоящие, главным образом, из гидроксидов железа. Поперечный размер потолочных образований (в целом) составляет 0,3-0,6 м, однако следует помнить, что они имеют неправильный

характер. К настоящему времени в пещере обнаружено 3 потолочные колонии, все – в Подвальном подрайоне района Голландский Сыр.

Аналоги в других средах

Железистые микробиалиты пещеры Золушка уникальны во многих отношениях. Вместе с тем, они могут быть соотнесены с микробиалитами, обнаруженными в других средах, богатых железом и марганцем, такими как необычные уплощенные конкреции и трубоподобные формы в глубокой части озера Коннектикут в Нью-Хемпшире, США (Asikainen and Werle, 2007; С. Asikainen, персональное сообщение), железо-марганцевые уплощенные микробиалиты из более мелкого (1-7 м) озера Вермиллион в Миннесоте, США (Sommers et al., 2002; S. Douglas, персональное сообщение), сталагмитоподобные образования на глубине ~800 м в заброшенной шахте Soudan в Миннесоте (Edwards et al., 2006; Boston & Spilde, неопubl. результаты; С. Alexander, неопubl. результаты) и донные карбонатные сталагмитоподобные структуры озера Павильон в Канаде (Laval et al., 2000; Lim et al., 2009).

Методика изучения материала микробиалитов

Для целей настоящего исследования железо-марганцевые колонии изучались, главным образом, в пещерных условиях, а также при помощи лабораторных методов. Произведен осмотр значительной части пещерного поля на предмет выявления железо-марганцевых колоний, в особенности, северо-западная часть лабиринта (район Голландский Сыр и переходный подрайон Подвалы). Поиск колоний - занятие достаточно трудоемкое, учитывая, что они могут быть локализованы не только на днищах пещерных ходов, но и на сводах. При обнаружении колоний производился тщательный осмотр участка, документирование местоположения, фотографирование места и колонии, выполнялись необходимые измерения и отбирались



Рис. 5. Потолочные колонии железо-марганцевых микроорганизмов: 1 = сталактитоподобная колония, 2 = пустотелая колония неправильной формы («осиное гнездо»).

пробы материала из разных ее частей – без нарушения целостности колониального образования. Материал, достаточно влажный и гигроскопичный, упаковывался в полиэтиленовый мешочек, чтобы предотвратить потерю влаги из образца, а затем в коробку со слоями ваты - с целью предотвращения механического повреждения образцов.

В лабораторных условиях производилось изучение образцов под оптическим и электронным сканирующим микроскопом (ЕСМ). Просмотр под оптическим микроскопом имел целью выбор наиболее интересных и типичных участков пробы для ее дальнейшего исследования под сканирующим электронным микроскопом.

Для изучения под ЕСМ производилось легкое подсушивание проб и напыление их поверхности – для предотвращения процессов разрушения и электризации. Собственно аналитические исследования производились под микроскопом FEI/Philips ESEM XL30 (LV HV) в условиях высокого и низкого вакуума. Изображения получены с помощью детекторов отраженных (SE) и вторично рассеянных (BSE) электронов, а также при их работе в смешанном режиме. Изучаемые пробы анализировались при увеличении от 100 до 4000 раз – до уровня нескольких микронов, т.е. границы нано- и микроразмерностей (шкал). Кроме качественного определения состава проб на EDS, диагностика минеральной части проб подтверждалась рентгеноструктурными исследованиями.

Из некоторых отобранных в пещере Золушка проб культивационными методами были выделены живые организмы, растущие очень медленно в лаборатории университета Нью-Мексико (США). Их количество еще недостаточно для исследования методами молекулярными, физиологическими и метаболического контрастирования. Кроме того, пока не очевидно, что эти организмы являются именно теми, которые столь хорошо представлены в микробиалитах пещеры Золушка. Поэтому мы сочли уместным привести результаты исследования морфологии и химического состава этих микроорганизмов и развить на этой основе рабочие гипотезы об их идентификации и биохимии.

Электронно-микроскопическое изучение показало, что основная масса материала железистых микробиалитов пещеры Золушка образована волокнистыми („ветки“) и кувшиноподобными („кувшины“) структурами, подробно описанными ниже, а также массой органического материала – „заполнителя“. Встречаются также менее распространенные элементы с другими морфологиями.

МОРФОЛОГИЯ И СОСТАВ ГРИБООБРАЗНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ КОЛОНИЙ

Пробы

В общей сложности под микроскопом изучено 14 проб материала, отобранного из стенок колоний, а также из корок у их подножия. Для проб характерно морфологическое разнообразие микроорганизмов, в котором, однако, обнаруживаются некоторые инвариантные характеристики. Во всех пробах (в

стенках корок) наблюдается отчетливая внутренняя зональность. При увеличении оказывается, что микрослои не являются циклично повторяющимися структурами, а скорее представляют собой зоны роста колонии, характеризующие ту или иную его стадию (активную или «реликтовую»), или «метаболические» зоны – по отношению к постройке в целом. Морфология изученных проб обнаруживает также связь с их свежестью (временем отбора и условиями хранения). Эти критерии – зональность в пробах и их свежесть – были положены в основу отбора иллюстративного материала, на котором базируется настоящий раздел статьи.

Первая проба – фрагмент стенки небольшого трубчатого сталагмита, отобранного в районе Голландский Сыр. До изучения под микроскопом проба пролежала в сухом месте более 5 лет и целиком высохла, сохранив, однако, свою внутреннюю (зональную) структуру. Вторая проба представляет собой свежееотобранный (но подсушенный в технических целях) материал. В ней, как и в первой пробе, обнаруживается зональность, однако морфология слагающих зоны микроорганизмов несколько отличается от первой пробы. Общие морфоэлементы проб указывают, что различия эти не имеют принципиального характера, а лишь дополняют общую картину, охарактеризованную ниже.

Зоны

Зональность выражена особенно отчетливо в первой пробе. В наружной части пробы, в разрезе стенки можно проследить три слоя с плохо выраженными границами: наружный слой ветвистых образований, средний слой, состоящий из «веток» и «кувшинов» и внутренний слой, в котором пространство между «ветками» и «кувшинами» целиком выполнено темной массой органического материала (рис. 6-1). Ширина зон составляет примерно 200-400 μm (микрон).

Наружный слой образуют «веточки» длиной 20-100 μm , на которых и между которыми как «плоды» располагаются несколько более толстые и короткие «кувшины» (рис. 6-2, 6-3). В общей массе микроорганизмов доминирующим элементом выступают «ветвистые» формы.

В среднем слое преобладают «кувшины»¹. Они располагаются на стыках «веточек» (рис. 6-4), но мере приближения к третьей – внутренней зоне – начинают преобладать целиком (рис. 6-5). Для зоны характерно также сращивание кувшинов между собой.

В третьей зоне доминирующим элементом является органическая масса, заполняющая все пространство между кувшинами, а чаще всего – и внутреннюю часть самих кувшинов (рис. 6-6). Поверхность органической массы очень гладкая, с изломами, напоминающими поверхность смолы или эпоксидного клея.

Описанная зональность позволяет предполагать, что рост стенок, а также их утолщение, были направлены наружу – в сторону внешней зоны с ветвистыми образованиями. На это указывает

¹Здесь и далее кавычки в слове кувшин и в других терминах, используемых в переносном смысле, для удобства опущены.

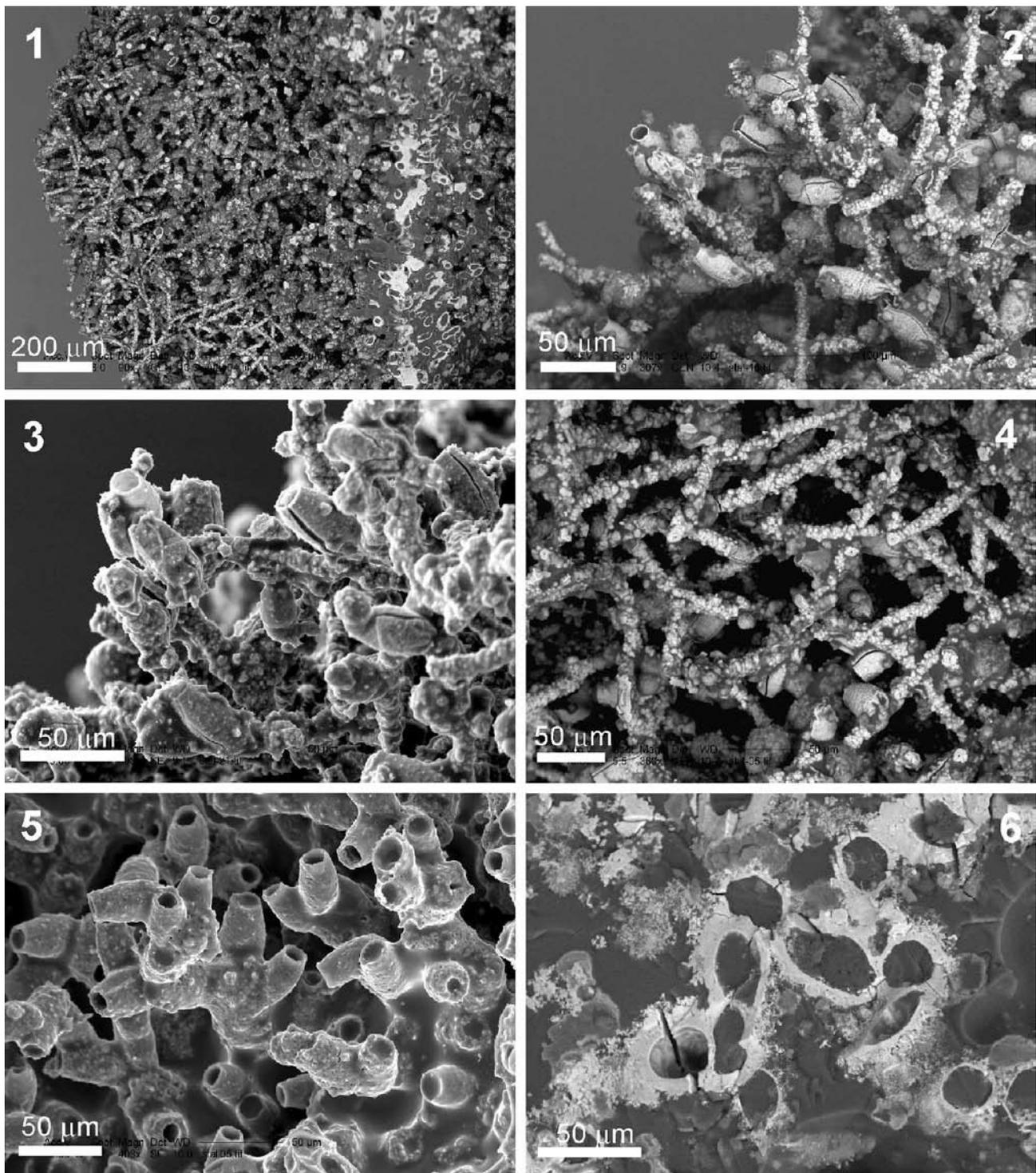


Рис. 6. Зональные особенности строения стенки трубчатого сталагмита: 1 = общий вид стенки в поперечном разрезе, 2, 3 = кувшиноподобные и ветвистые образования внешней зоны, 4 = кувшины среди ветвистых образований средней зоны, 5 = участок скопления кувшинов в средней зоне, 6 = кувшины в органической массе внутренней зоны.

увеличение степени минерализации и плотности вещества стенки снаружи внутрь и наоборот: увеличение его рыхлости, пористости и «ветвистости» в обратном направлении - наружу.

Ниже, отмеченные элементарные структуры зон рассматриваются более детально как с точки зрения морфологии элементов, так и их состава.

Кувшины

Представляют собой один из наиболее интересных и, возможно, «ключевых» элементов стенок колониальных построек. Морфологически они весьма однообразны и практически одинаковы по своим размерам (рис. 6-3, 6-5). Основания кувшинов примерно в два раза шире, чем их верхние части. Устьевые части кувшинов почти всегда открытые. Высота кувшинов

колеблется в пределах 50-70 μm , диаметр 15-20 μm в верхней (устьевой) части и 30-40 μm у основания. Толщина их стенок измеряется несколькими (2-5) микронами, но может немного варьировать - в зависимости от характера их наружной поверхности. Довольно часто стенки кувшинов пересекают щель, причем, чаще всего, с обеих - противоположных сторон (рис. 7-1). Внутри кувшины заполнены темной органической массой, образующей отчетливый мениск (рис. 7-2). Материал, заполняющий кувшины, имеет почти исключительно углеродистый состав с очень малыми примесями железа и хлора (рис. 7-3). В разных частях проб могут преобладать кувшины пустые или полные органического вещества, но практически всегда совместно встречаются и те, и другие.

В составе стенок кувшинов выявлены, помимо органики, железо и кальций, а также фосфор и кремний (рис. 7-4). В заметных количествах присутствуют также сера и мышьяк. Внутренние стенки кувшинов, как правило, гладкие. Наружные же отличаются значительным разнообразием микрорельефа. Кроме относительно гладких поверхностей (рис. 7-2, 8-1), весьма часто встречаются пупырчатые, покрытые мелкими бугорками (рис. 7-5) или «бородавчатые» поверхности (рис. 7-6). При существенном увеличении (граница микро- и нано масштабов) видно, что в действительности поверхность и тех, и других, весьма

шероховата. Этим, в значительной мере, определяются высокие сорбционные свойства гидроксидов железа, которыми сложены постройки. Величина бугорков обычно в пределах 0,5-1,0 μm . Их форма изменится от шаровой (бактерии?) до угловатой. Довольно часто бугорки образуют своеобразный «венчик» вокруг отверстий кувшинов. Бугорки и «бородавочки» имеют тот же состав, что и стенки кувшинов, но с некоторым увеличением количества железа. Вполне возможно, что разница в содержании органики и железа между самой стенкой кувшина и образованиями на его поверхности еще более существенна, но оценить ее сложно, так как электронный пучок при исследовании на ЕСМ, проникая сквозь железистые «бородавочки», анализирует также более органическую подложку стенки, выравнивая, до некоторой степени, разницу состава. По этой причине спектр фактически двухфазового органоминерального образования может быть немного размытым. Кроме бугорчатых образований, для кувшинов, особенно их нижних частей, характерны разнообразные наросты (рис. 7-1, 7-6).

Кувшины представляют собой достаточно delicate образования. Это подтверждает также эксперимент, проведенный во время изучения одной из проб. На рис. 8-1 и 8-2 показан один и тот же кувшин - до (рис. 8-1) и после (рис. 8-2) удара в него 5-микронным пучком электронов. Видно схлопывание кувшина и появление на его поверхности складок и морщин. Последние, с одной стороны, указывают на определенную эластичность стенок, с другой же - на возможную внутреннюю пустотность кувшина или его стенок. При ударе пучком электронов произошла как бы «разгерметизация» структуры. Это обстоятельство подтверждает высказанное ранее предположение о наличии некоторого внутреннего давления внутри кувшина, поддерживающего его форму и выдавливающего органический материал наружу (см. рис. 7-1 и 7-2).

Некоторое представление о внутреннем строении кувшинов дают рисунки 8-3 и 8-4. На них показаны кувшины в разрезе. Как на одном, так и, особенно, на другом (8-4) рисунке внутри кувшинов видны сферические углубления. Они располагаются в центре кувшинов, ближе к их основанию. Видно, что внутренние сферы изолированы от стенок кувшина тонким слоем органической массы, заполняющей кувшин.

В поперечном разрезе кувшинов обращает на себя внимание еще одна деталь. У их основания, на фоне темной органической массы, часто выделяется некий отросток, ассоциирующийся со спорой. Отросток прикреплен к стенке основания и может иметь разную

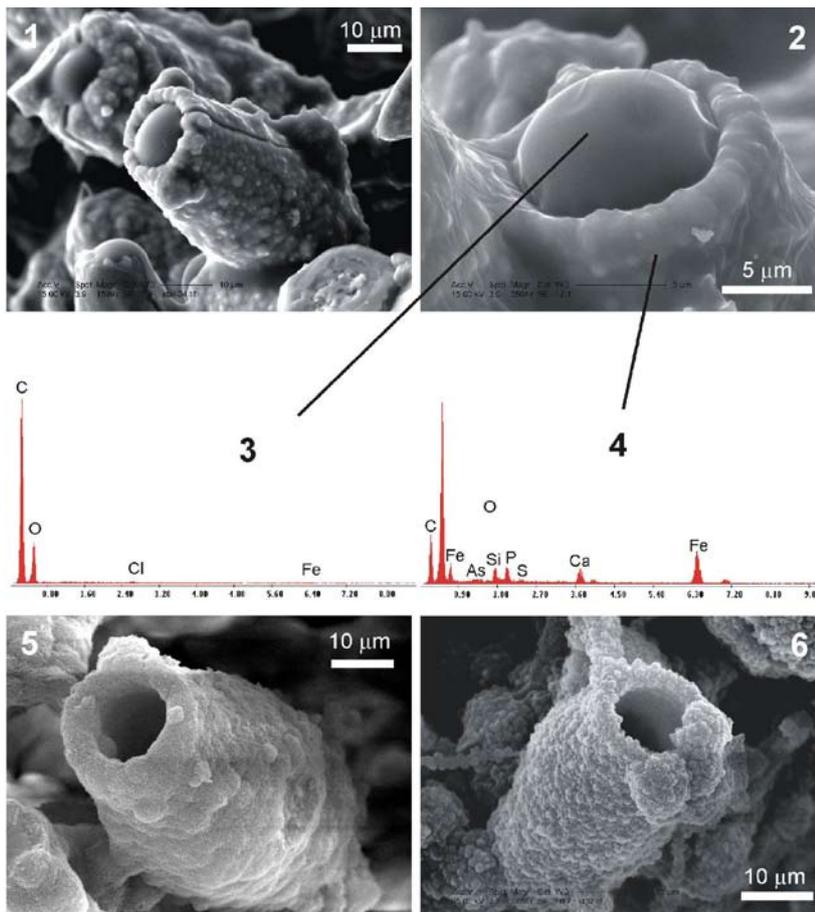


Рис. 7. Внешний вид и микроэлементный состав кувшиноподобных образований: 1,2 = кувшины крупным планом, 3,4 = состав органического заполнителя (3) и стенок (4) кувшина, 5,6 = характерные кувшины с бугорчатой поверхностью.

форму. Два изученных нами отростка имели соответственно веерообразную (рис. 9-1 и 9-2) и пикообразную (рис. 9-3 и 9-4) форму. Однако вполне вероятно, что пикообразный отросток представляет собой «вид сбоку» отростка веерообразной формы. На фото в левой части рис. 9 показаны в разрезе кувшины и локализация отростков (отмечены белыми кружками), а в правой – сами отростки крупным планом. Видно, что форма отростков правильная. Их размеры измеряются первыми микронами: веерообразный отросток – 5х6 мкм, пикообразный – 2х7 мкм. Состав отростков качественно не отличается от органической массы, в которой он сидит (сравни рис. 9-5 и 9-6). Некоторая разница высоты пиков может быть обусловлена разным содержанием водорода в обеих органических массах (отсюда и цветовые различия масс). В данном случае, важен факт, что отростки представляют собой чисто органическую материю, качественно отличающуюся от минерализованных «панцрей» кувшинов, к которым они прикреплены.

Органическая масса с кувшинами

В третьей зоне кувшины располагаются в органической массе, заполняющей все пространство между ними, а в большинстве случаев – и сами кувшины (рис. 9-3). Качественная однотипность состава органической массы вне и в самих кувшинах (сравни спектры на рис. 10-1 и 10-5) позволяет считать их идентичными и одинаковыми по происхождению. Вполне возможно, что органическая масса между кувшинами является продуктом их жизнедеятельности, т.е. образована органикой, продуцируемой кувшинами и «выталкиваемой» наружу. На рис. 9-3 кувшины в массе показаны в разрезе. Большинство из них заполнены органикой. Венцовые части кувшинов расширены, скорее всего, в результате бактериальной деятельности. По качественному составу они практически не отличаются от стенок кувшинов, но более железисты (рис. 10-2). Еще больше железа содержат светлые «выцветы» на поверхности органической массы, тяготеющие к краям кувшинов (рис. 10-4).

Во второй, более свежей пробе, доминирующим элементом

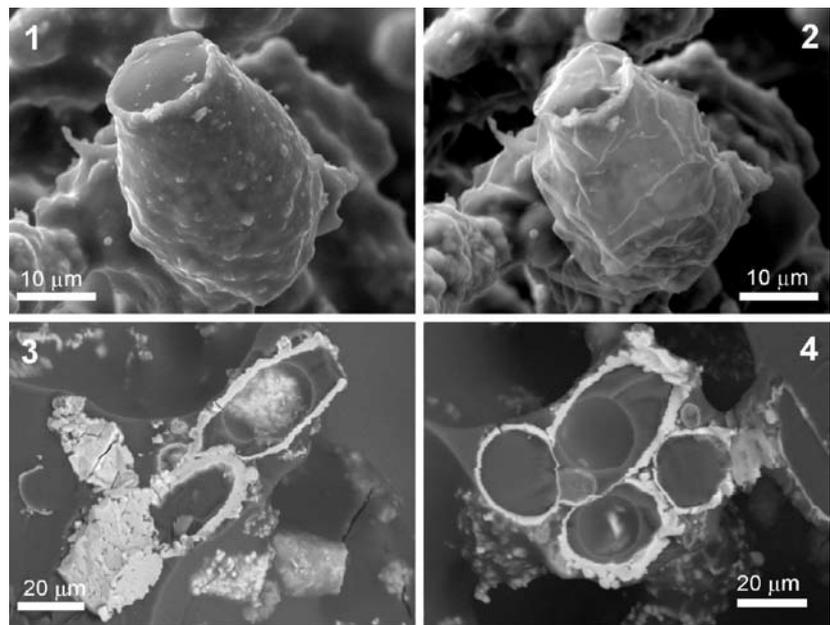


Рис. 8. Особенности внутреннего строения кувшинов: 1 = ненарушенный кувшин, 2 = «схлопнувшийся» кувшин, 3, 4 = кувшины в разрезе с видимыми внутренними отростками (3) и шаровидными углублениями (4).

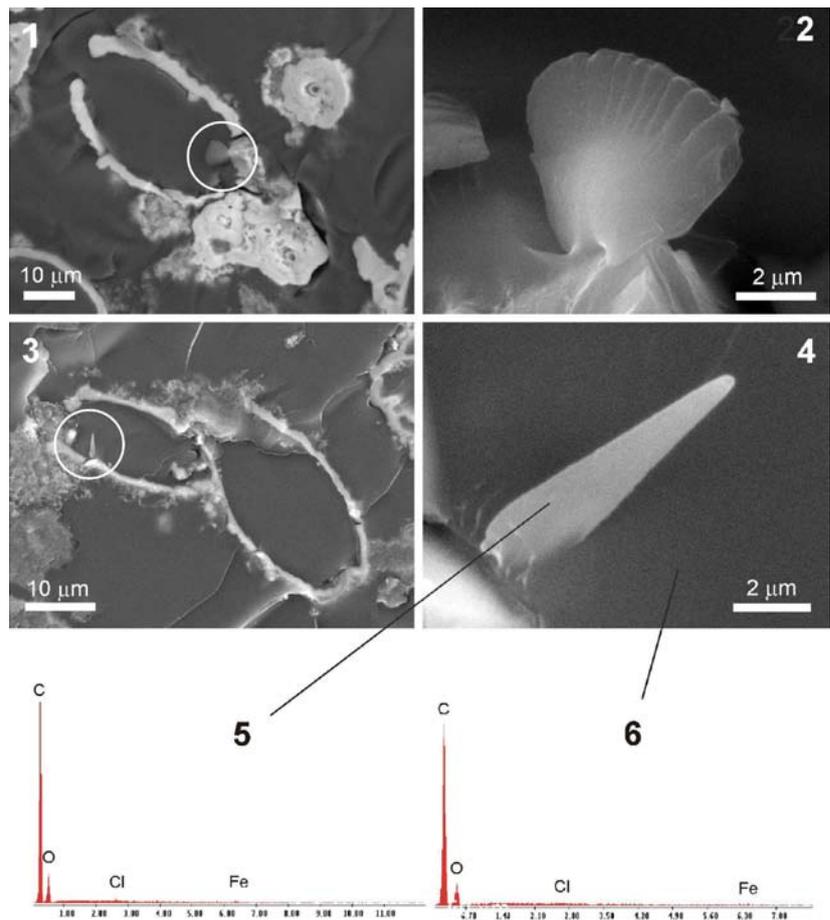


Рис. 9. Споривидные «отростки» внутри кувшинов: 1, 3 = общие виды кувшинов в разрезе; 2, 4 – «отростки» в кувшинах крупным планом; 5, 6 = состав «отростков» (5) и органического заполнителя (6) внутренней части кувшинов.

«микробиологического пейзажа» являются разного рода ветвистые образования, образующие «заросли» (рис. 11 и 12). Под небольшим увеличением видно, что заросли имеют ориентированный характер (рис. 12-1, 12-2). При их рассмотрении более крупным планом ориентировка исчезает, но проявляется весьма сложная и пока не очень понятная картина симбиотических связей железобактерий и грибообразных микроорганизмов (рис. 11-1 - 11-6). В данной пробе обращает на себя внимание значительно меньшее присутствие кувшинов, но хорошо заметны их пространственные отношения (функциональные связи) с окружающими ветвистыми образованиями. В массе зарослей они встречаются как единично (рис. 11-3), так и группами (рис. 11-3, 11-4). В некоторых участках зарослей они практически отсутствуют или слабо заметны. В подавляющем большинстве случаев кувшины в зарослях полые. Для кувшинов в зарослях характерны также бугристая и бородавчатая поверхности, а также наличие венчиков вокруг отверстий. Кувшины, как правило, прикреплены к веткам зарослей. В некоторых случаях (рис. 11-5, 11-6) они соединяются с ветками тонкими корнеподобными отростками микронного размера (толщины). Ветвистые образования характерны также для первой пробы (внешняя зона, см. выше). Но именно во второй пробе они проявляются во всем своем многообразии и были изучены более тщательно.

Ветки

Волокна, или «ветки», образуют густую массу и по форме напоминают водные растения или мох. Чаще всего, основная масса веток имеет выраженную ориентировку, причем однозначно ориентированы только более крупные из них, как на рис. 12-1. Кроме крупных, ориентированных веток, в их зарослях имеется еще несколько поколений меньшего размера, соединяющих более крупные ветки. Наименьшие ветки часто образуют скопления, напоминающие хаотическую паутину. Длина наиболее крупных веток измеряется первыми сотнями микронов, толщина (диаметр) – 5-10 μm . Менее крупные – соединительные – ветки имеют длину несколько десятков, а толщину 3-5 μm . Часто ветки образуют единую сросшуюся массу. Наиболее мелкие – паутинные нити – измеряются несколькими (до 10) микронами в длину и около микрона и менее в толщину. Крупные ветки, как правило, изобилуют разного рода утолщениями и бугорками разной величины на их поверхности (рис. 12-2, 12-3 и 12-4). Особенно крупные утолщения возникают в местах соединения веток (рис. 12-3). Их поверхность также бугорчатая, а при ближайшем рассмотрении – на границе микро- и наномасштабов – заметна шероховатость, имеющая «хлопьевидный» характер (текстура «мятой бумаги»). Ветвистая масса обладает высокой пористостью (существенно более 50%), а также очень высокой сорбционной емкостью.

В поперечном разрезе веток проявляется выраженная концентрическая зональность (рис. 12-5). Центральную часть занимает небольшой округлый канал, диаметром 0,5-1,0 μm , как правило, заполненный. Вокруг канала располагается несколько зон (обычно 2-3) с резкими границами. Линия границ обычно неровная, угловатая. Часто на границе зон развиты небольшие включения, иногда правильного, шаровидного характера (рис. 12-5). Состав включений (рис. 12-6) соответствует составу оболочек кувшинов (см. рис. 7 и 13).

Качественное изучение состава веток показало, что кроме органики в них присутствуют в значительных количествах (в сторону убывания) Fe, Ca, P, Si, As и Cl. Послойное изучение веток указывает на принципиальную однотипность состава отдельных слоев и мелких включений в них (рис. 13). Разница заключается в пропорциях между упомянутыми составляющими. Просматривается также закономерность увеличения количества железа к наружным оболочкам (рис. 13-2 – 13-5). На изменении соотношения углеродистых соединений и железа – как главных составляющих – указывает цвет зон и включений: смещение окраски в

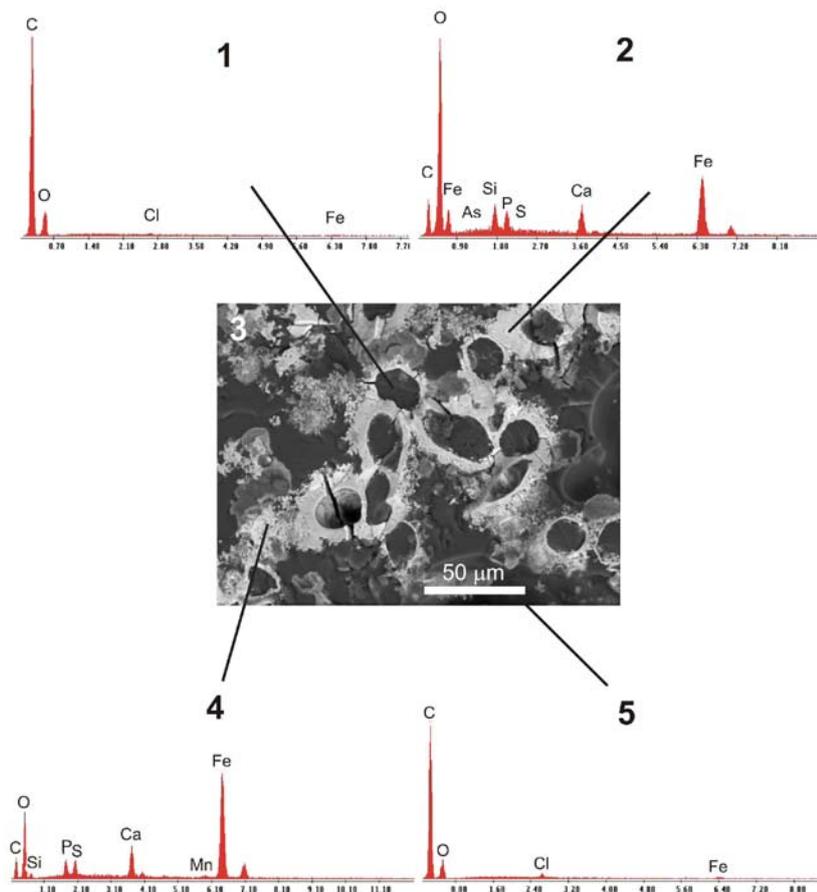


Рис. 10. Состав органической массы с кувшинами (третья зона): 1 – наполнитель кувшина, 2 – стенка кувшина, 3 – общий вид образца анализируемого материала, 4 – пористые скопления «панцирного» материала, 5 – вмещающая органическая масса (матрица).

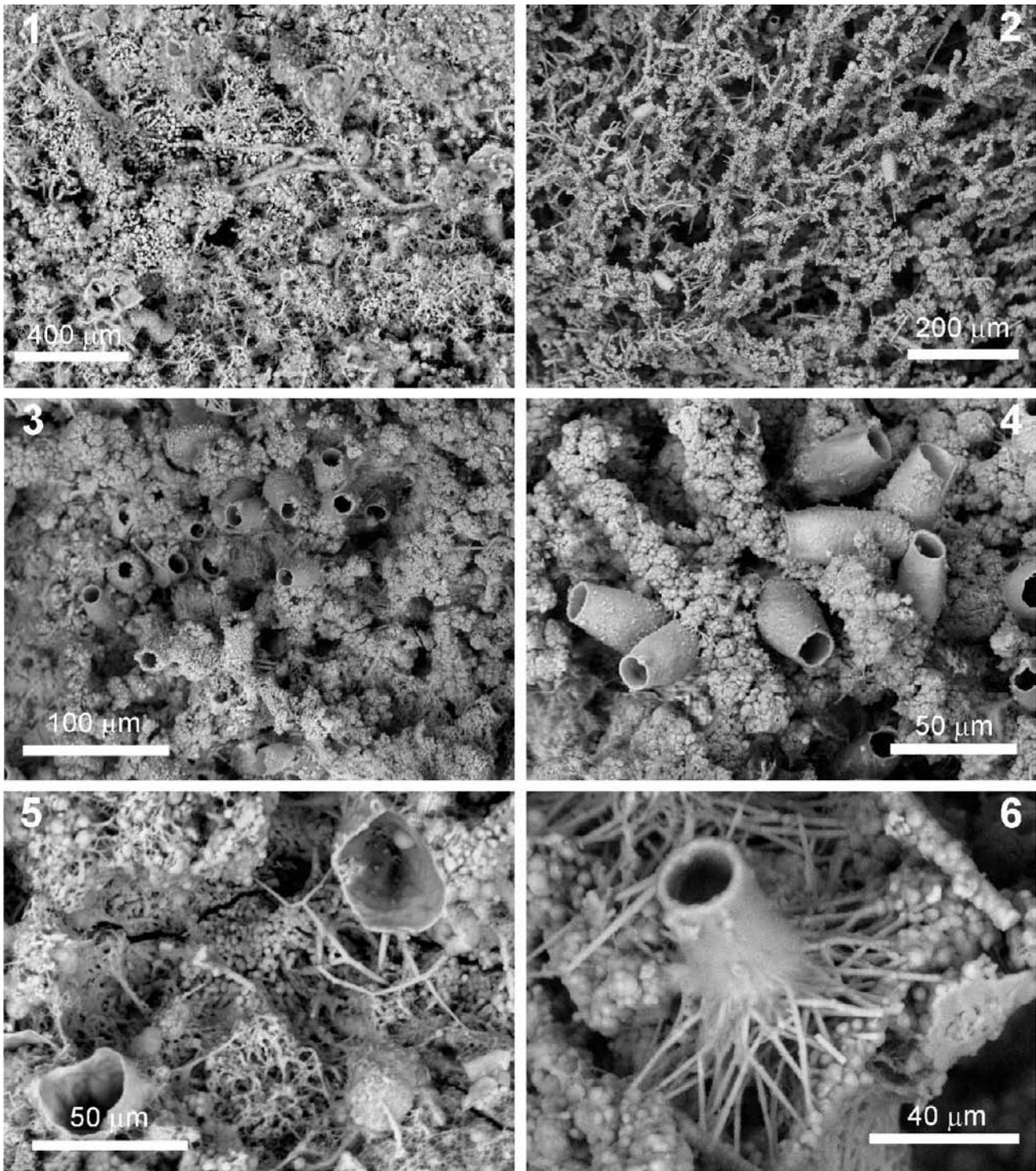


Рис. 11. Кувшины и ветвистые микробные образования: 1,2 = общий вид; 3,4 = кувшины в массе «веток», образуемых железобактериями; 5,6 = характерные соединения кувшинов с ветвисто-бактериальной массой. Корнеподобные структуры возможно являются основанием и прикрепляющей частью грибов. Шишковидные образования являются минеральным покровом, состоящим из гидроокислов железа.

темную часть условного спектра свидетельствует об увеличении содержания С, а в светлую – Fe.

Железобактерии

Пространство между ветками исследуемой пробы во многих местах выполняют округлые шарики железобактерий (рис. 11-1). Они образуют видимые скопления – по несколько десятков или сотен штук, а

также встречаются, в довольно большом количестве, и поодиночке. По форме это почти правильные шарики, диаметром от 1-2 μm и меньше (0,3-0,8 μm). Одиночные шарики, чаще всего, «сидят» на ветках (рис. 14). В зависимости от увеличения, их поверхность выглядит более гладкой (рис. 14-1 и 14-2) или более шероховатой (рис. 14-3). Фактически же, поверхность всех шариков шероховата, имеет текстуру «мятой

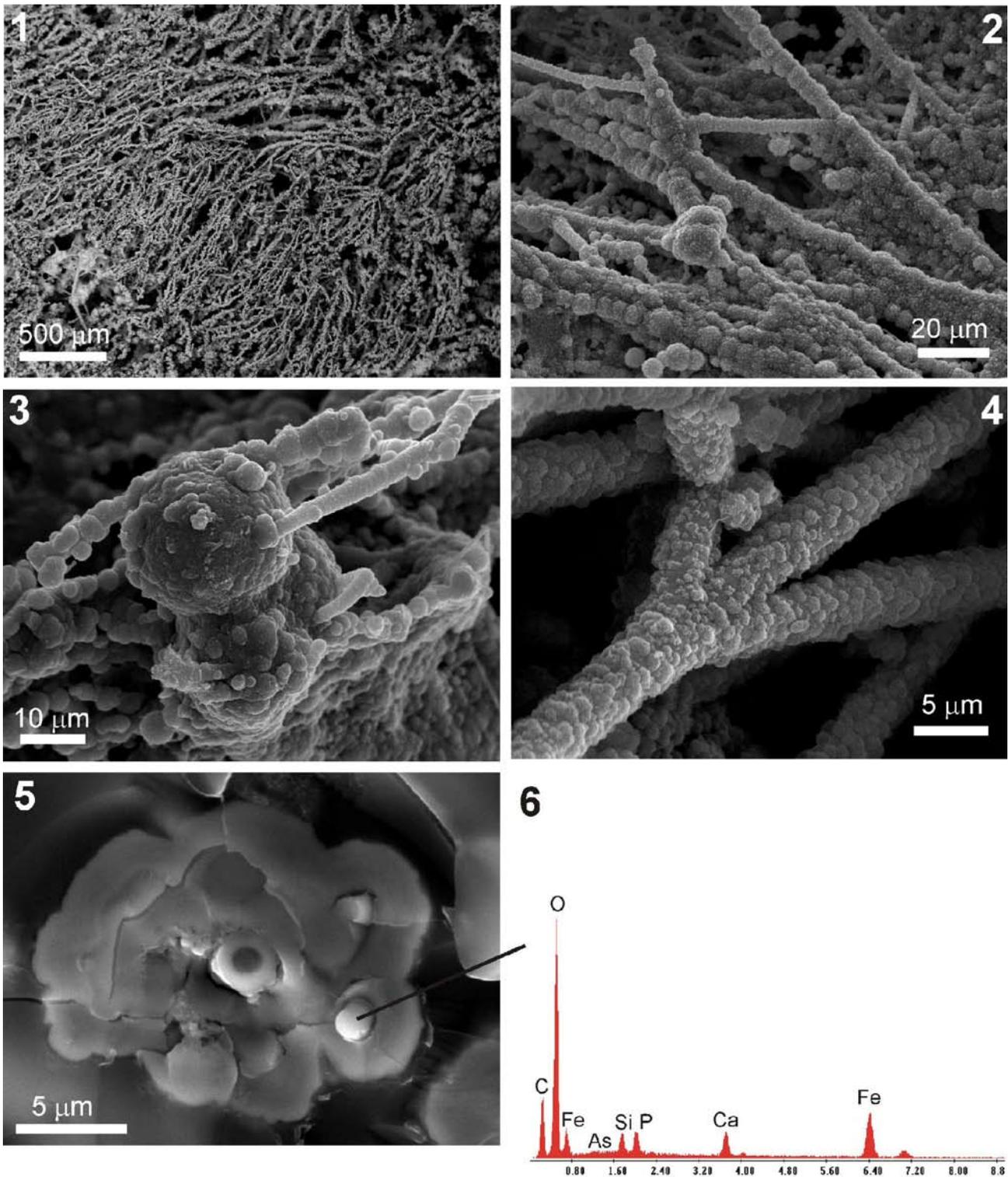


Рис. 12. Строение ветвистых образований: 1,2 = общий вид; 3,4 = узловые (3) и линейные (4) элементы «веток» крупным планом; 5 = «ветка» в поперечном разрезе; 6 = состав шаровидного включения в наружной оболочке «ветки».

бумаги». Отличия обусловлены величиной «хлопьев», образующих их наружный слой. Некоторые крупные шарики опутывает сеть очень мелких веточек толщиной до 0,5 μm , а на их поверхности развита «паутина» еще более мелких ветвистых образований, размерами в десятки нанометров (рис. 14-4).

Для всех охарактеризованных выше элементов органоминеральной массы микроорганизмов - веточек,

шариков, а также кувшинов характерна текстура «мятой бумаги». Шероховатость эта - несмотря на разный масштаб проявления - характеризуется морфологическим однообразием. Это, в частности, видно на примере рис. 14-3, где прослеживаются три ее размерные генерации: на поверхности шарико-бактерии, на более мелких окружающих ее бугорках и на поверхности самой веточки.

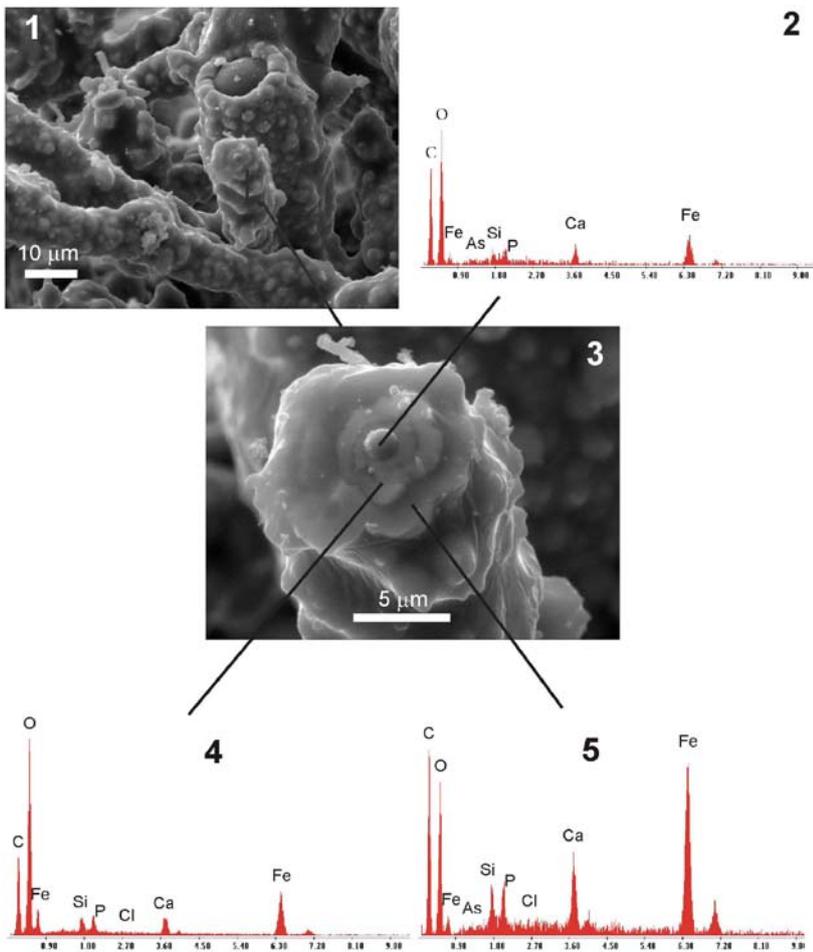


Рис. 13. Зональный состав «ветки»: 1 = общий вид исследуемой «ветки»; 2,4,5 = качественный микроэлементный состав ее канальной части (2) и окружающих слоев (4,5); 3 = головка исследуемой «ветки» крупным планом.

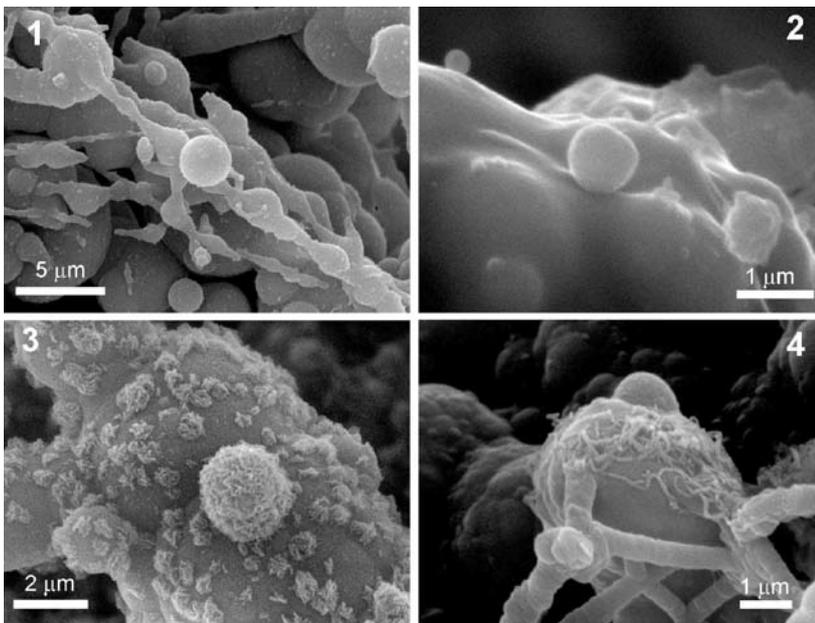


Рис. 14. Железобактерии и нитевидные образования на стенках «веток»: 1-3 = сферические образования; 4 = ветвистые формы.

ОБСУЖДЕНИЕ: ПРОБЛЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ГРИБООБРАЗНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ ЖЕЛЕЗИСТЫХ МИКРОБИАЛИТОВ

Отмеченные выше трудности культивации живых организмов железистых микробялитов пещеры Золушка пока задерживают их идентификацию методами молекулярными, физиологическими и метаболического контрастирования. Некоторые рабочие гипотезы могут быть развиты на основе вышеприведенного исследования морфологии и химического состава микроорганизмов.

Размеры кувшинов не соответствуют типичным размерам бактерий. Другие возможные микробные группы, которым кувшины соответствуют по размерам, включают одноклеточные (протисты) и грибы. Несколько ведущих специалистов по протистам, с которыми авторы консультировались (S. Porter, UC Santa Barbara; M. Dolan, U Mass – Amherst), считают, что кувшины из микробялитов пещеры Золушка не могут быть сопоставлены с каким-либо типом протист, с которыми они знакомы.

Знакомство с микологической литературой одного из авторов этой статьи (П.Бостон, геомикробиолог), а также консультации с другими микологами (Н. Vishniac, OK State University), не позволяют идентифицировать обнаруженные в пещере Золушка микроорганизмы по их морфологии. В настоящее время известно и описано около 70 тыс. видов грибов. Согласно некоторым оценкам (Hawksworth, 1991; Hawksworth et al., 1995), количество существующих видов грибов может достигать 1,5 млн.

Группы грибов, которым наиболее соответствуют наблюдаемые морфологические характеристики кувшинов, являются Ascomycota или близкие к ним Basidiomycota. Некоторые диморфные виды, такие как широко распространенные *Candida albicans*, могут изменяться от одноклеточной формы к волокнистой многоклеточной гифовой массе (Jones et al., 2009). Другие виды являются плеоморфными (имеющими множественные формы), что охватывает как асексуальную (анаморфную), так и сексуальную

(телеморфную) фазы роста. В других пещерных микробиологических исследованиях одного из авторов часто отмечалось, что как грибы, так и бактерии в этих условиях демонстрируют высокую пластичность форм, будучи во многих случаях плеоморфными.

Если кувшины являются одним из типов грибов, особенно аскомицетами, то можно предположить, что морфология кувшинов на ветках является спорангием (асексуальной споросодержащей структурой), а сферические объекты внутри их являются спорами. Фотографии 1 и 2 на рис. 7 вероятно показывают появление новой грибной клетки из спорангия во время презервации. Щели на сторонах многих кувшинов могут быть трещинами дегидратации, образующимися вследствие высыхания или минерализации во время презервации. Однако, их однообразие и широкое распространение могут указывать на то, что они являются разрывами-дегисценциями, известными для многих грибов, обладающих механизмами активного выталкивания спор в среду (Jones et al., 2009). Один из экспертов, с которыми консультировались авторы (S. Douglas, NASA Jet Propulsion Laboratory), отметил, что морфология кувшинов напоминает некоторые необычные морские грибы, однако оснований для однозначной идентификации пока не выявлено.

В исследованном материале имеются структуры, которые выглядят как миниатюрные корневища стволов (панели 5 и 6 на рис. 11). Это могут быть отростки, которыми грибы прикрепляются к поверхностям. Более вероятно, что это ризоиды, которые многие грибы используют для внедрения в питающий субстрат и прикрепления к нему (Hawksworth et al., 1995). Многие виды Chytridiomycota существуют либо как одиночные округлые клетки (одноклеточные виды), либо как слабветвящиеся цепи клеток с кустами ризоидов. Развитые структуры ризоидов имеют также многие Zygomycota.

Несмотря на отмеченные выше аналогии с известными группами грибов, имеется высокая вероятность того, что микроорганизмы железистых микробалитов из пещеры Золушка являются новыми для науки.

ДРУГИЕ МИКРОБИАЛИТЫ И МИКРОБНЫЕ ФОРМЫ В ПЕЩЕРЕ ЗОЛУШКА

Черные порошкообразные покровы

Богатые марганцем корки, рыхлые железомарганцевые спелеосолы (почвоподобные покровы в пещерах, сформированные процессами

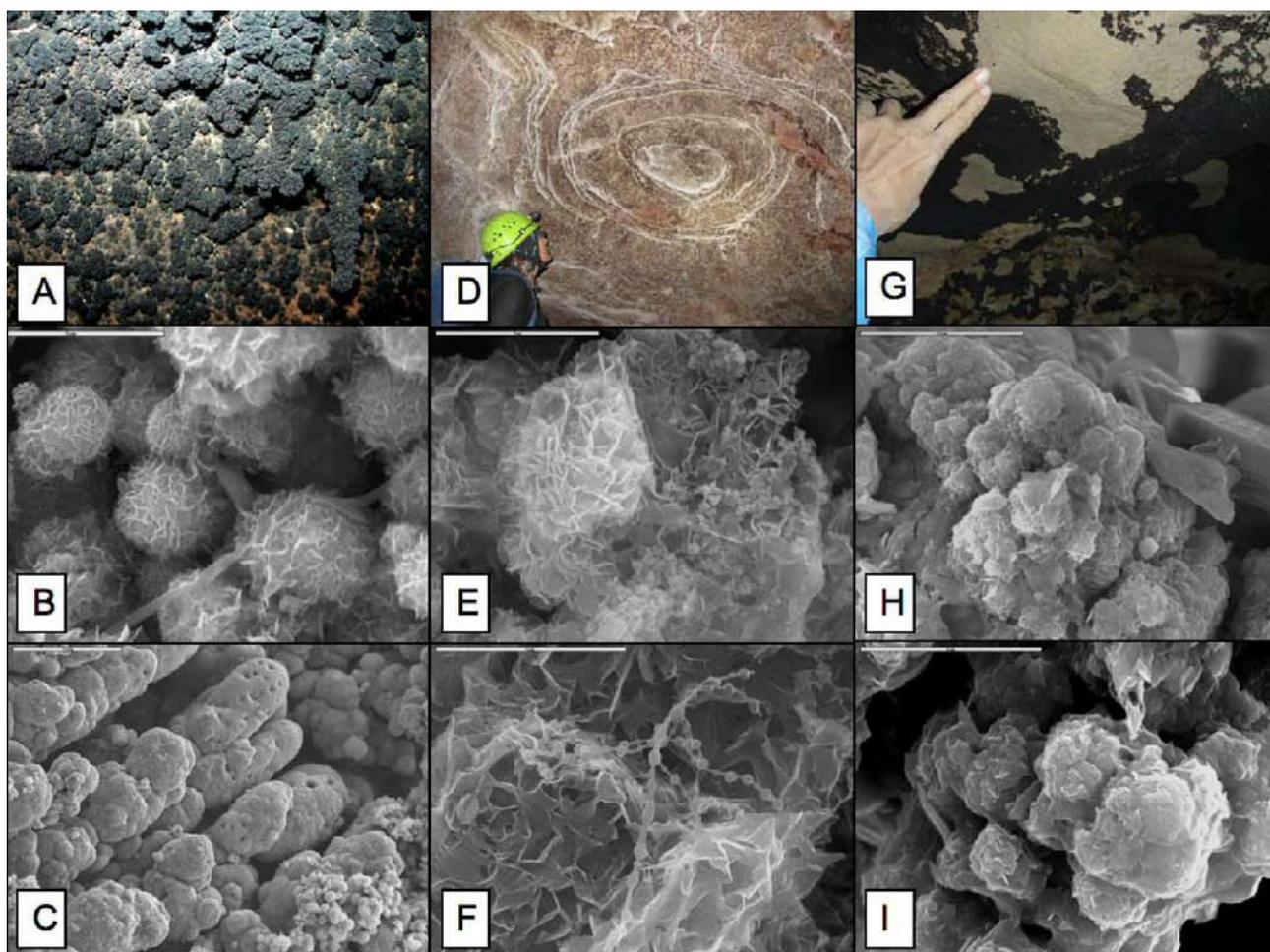


Рис. 15. Сравнение отложений гидроксидов марганца в пещере Золушка, Западная Украина (С) и пещерах Lechuguilla (D-F) и Ft. Stanton Cave, Нью-Мексико, США (G-I). Пояснения см. в тексте. Размеры масштабных линеек на микрофотографиях: С = 50 μm ; В, Е, I = 5 μm ; H = 10 μm . Фото А: П.Бостон, фото D: М. Спилд, все микрофотографии: П.Бостон и М.Спилд.

пещерного выветривания при значительной биогенной составляющей) и дендриты обнаружены во многих гипогенных пещерах см. также (Семиколенных, Таргульян, 2010; Spilde et al., 2005, 2009; Northup et al., 2003; Boston et al., 2001, 2004; Maltsev, 1997; Cunningham et al., 1995 и др.). Пещера Золушка обнаруживает выдающиеся примеры рыхлых черных покровов этого типа, сложенных гидрооксидом марганца (рис. 15-А). При электронно-микроскопическом исследовании этого материала видны характерные минеральные морфологии, выявленные в других пещерах (Spilde et al., 2005), и ряд микробных форм. Фото В и С на рисунке 15 показывают микротекстуры этого материала в сравнении с подобным материалом из пещер Lechuguilla, Spider, Ft. Stanton Cave и Cavenee Caverns в штате Нью-Мексико и пещеры La Tetera в Аризоне (США). На верхнем ряду фотографий видно, что микроскопический облик материала различен, хотя гидрооксиды марганца проявляются темным или черным цветом во всех случаях. Однако при микроскопическом исследовании хорошо видна характерная хлопьевидная текстура (или текстура „мятой бумаги“). Такая же текстура отмечена на „шариках“ материала железистых микробалитов (рис. 14-3). Фото С на рис. 15 из материала Золушки демонстрирует характерные бугры и „башни“ гидрооксида марганца, отсутствующие на соседних примерах из других пещер, но наблюдаемые в богатых марганцем текстурах материала скального „пустынного загара“ на поверхности (Boston and Spilde, неопубликованные результаты). Гидроокислы марганца с микроскопической хлопьевидной текстурой часто сопровождаются организмами четкообразной структуры, пример которых из пещеры Лечугия виден на рис.15-Е. Они недавно были культивированы. Эта микробная морфология является широко распространенной в различных подземных средах, богатых марганцем, железом и карбонатами.

“Сопли” и Y-образные петли

Широкое распространение в Золушке имеют также оригинальные микробные образования в виде сталактитов с корневыми креплениями в основании (рис. 16, 1-2). Они распространены в пещере повсеместно и, чаще всего, свисают с образованных туфоподобными карбонатами сводов или со стенок карбонатных кулис.

Как правило, они образуют группы и скопления, и гораздо реже выступают единично. В большей части пещеры эти образования существенно обогащены глинистой составляющей, хотя их сердцевина сложена гидрооксидами железа и в поперечном сечении обнаруживает некоторую концентрическую зональность. В дальних же районах пещеры, например, Геохимическом, они “разжижены”, слизисты на ощупь и имеют вид соплевидных натеков разной формы (рис. 16, 4-9) от тонких нитей, длиной 5-15 см (рис. 16, 4-6), до уплощенных конических перепонки (рис. 16, 7-9). Для нитей характерны Y-образные соединения у основания (рис. 16-6), в то время как перепонки характеризуются морфологической сплошностью. Поверхность более крупных нитей шероховата (рис.

16-5). Морфологическое сходство соплевидных, слизистых, нитевидных форм Геохимического района со сталактитоподобными формами остальной части пещеры позволяет предполагать, что все эти формы представляют собой эволюционные состояния одних и тех же образований: свежие соплевидные образования представляют начальные (биохимические) фазы размножения микроорганизмов, в то время как сталактитоподобные минерализованные формы представляют собой “фоссилизированный” (биогеохимический) результат их жизнедеятельности. Предположение это нуждается, естественно, в проверке дополнительными исследованиями. Материал фоссилизированных образований под электронным микроскопом обнаруживает характерные микробные структуры (рис. 16-3).

В контексте описанных образований, представляет несомненный интерес их сравнение с подобными образованиями из других пещер (рис. 16, 10-12). Характерные слизистые, богатые бактериями, натеко-капельные образования обнаружены в пещерах Villa Luz в штате Табаско, Мексика (Hose and Pisarowicz, 1999; Hose et al., 2000), Frassassi в Италии (Macalady et al., 2007), в горных выработках (e.g. Ziegler et al., 2009) и даже в морской среде в затонувших судах (Cullimore and Johnston, 2000). Фоссильные примеры таких структур идентифицированы в пещерах Lechuguilla Cave (Davis et al, 1990), Cottonwood Cave (Melim et al., 2009) и Cueva de Villa Luz (Boston et al., 2006). Похоже, однако, что их местонахождение в Золушке является одним из наиболее богатых и разнообразных.

Сетчатые волокна

В материале Золушки обнаружен один экземпляр сетчатого волокна (рис. 17), который группа П.Бостон обнаруживала во многих пещерных средах в разных районах мира, но идентификация которых остается загадкой (Melim et al., 2008). Эти структуры явно биологические, всегда имеют диаметр около 0,5 микрон и длину в десятки микрон. Они встречаются в карбонатных пещерных системах, лавовых пещерах, а теперь обнаружены и в гипсовой пещере. Они встречаются в пещерах, образованных в широком диапазоне температурных и прочих условий, отдельными экземплярами в минеральном материале карбонатов, Fe/Mn отложениях, сернокислотных минералах, сульфатах и медных сульфидах и окислах.

ЗНАЧЕНИЕ МИКРОБНЫХ СТРУКТУР ПЕЩЕРЫ ЗОЛУШКА

Изучение микробных структур пещеры Золушка является важным для понимания геохимии гипогенных пещерных систем, испытывающих трансформации гидрогеологических и геохимических состояний, а также для выявления роли микробиологических процессов в формировании минеральных масс. Имеется высокая вероятность, что некоторые микробные формы, обнаруженные в пещере, являются новыми для науки. Значение, который имеют такие сохранные микробные формы для понимания древних сред на различных этапах развития Земли, является областью

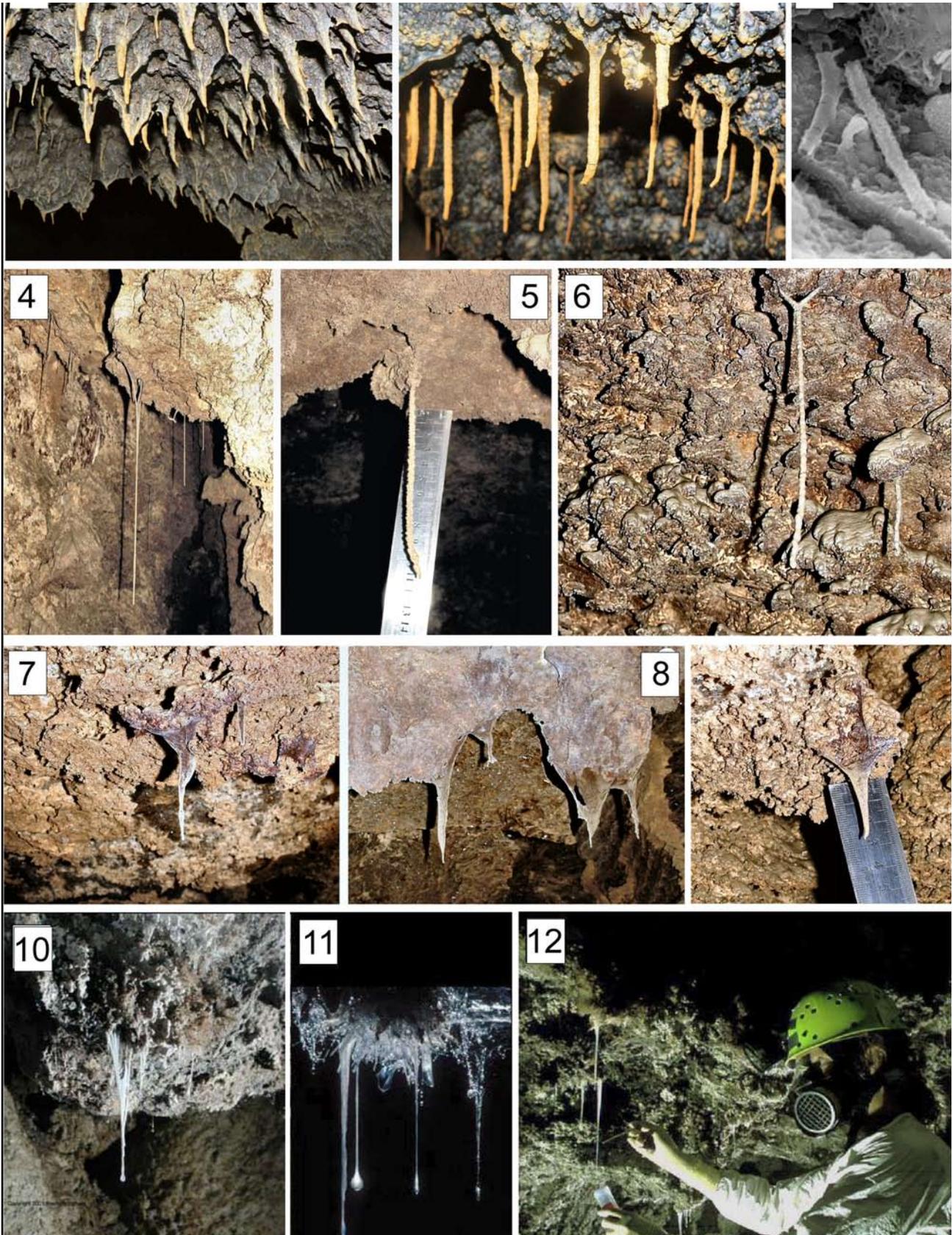


Рис. 16. Сталактитоподобные, нитевидные и соплевидные микробные образования в пещере Золушка и других пещерах: 1 – 2 = общий вид и крупный план фосилизованных, глинистых сталактитоподобных спелеотем; 3 = вид под электронным микроскопом материала этих спелеотем; 4 – 9 = соплевидные микробные образования района Геохимический: нитевидные с Y-образным основанием (4, 6) и шероховато-бугорчатой поверхностью (5), перепончатые единичные (7, 9) и в виде занавеси (8); 10-12 = сернокислотные соплевидные образования из пещеры Villa Luz в штате Табаско, Мексика. Фото 1-2 В. Андрейчука; 3 – М.Спилд и П.Бостон; 4-9 И.Телешмана, 10-12 Кеннет Ингам.

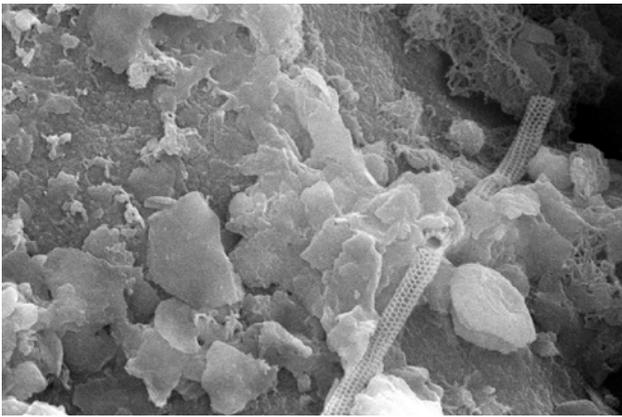


Рис. 17. Микрофотография сетчатого волокна в «ландшафте» других микробных форм, дегидратированных биопленок и минеральных зерен. Фото: М.Спилд и П.Бостон.

высокого интереса в геобиологии и микропалеонтологии (Westall, 2008). Наконец, подземные микробные биосигнатуры (следы жизни) являются важными аналогами для будущих миссий, направленных на поиск жизни на других планетах солнечной системы (Hofmann, 2008; Boston et al., 2001, 1992).

ЛИТЕРАТУРА

Андрейчук В.Н., Пещера Золушка. - Издание Факультета Наук о Земле Силезского университета и Украинского института спелеологии и карстологии. - Сосновец-Симферополь, 2007. - 408с.

Андрейчук В.Н., Волков С.Н. Железо-марганцевые сталагмиты в пещере Золушка // Пещеры. Пещеры в гипсах и ангидритах. - Пермь, 1988. - С. 128 - 130.

Волков С.Н., Андрейчук В.Н., Янчук Э.А., Смирнов Б.И. Современные железо-марганцевые образования пещеры Золушка // Минералогический сборник. - Вып.1. - Львов, 1987. - №4.

Волков С.Н., Смирнов Б.И., Янчук Э.А. Железо-марганцевые образования пещеры Золушка // Доклады АН СССР. - Том 292. - М., 1987. - №2.

Волков С.Н. Геохимические изменения среды при техногенном воздействии на карстовую пещеру Золушка // Геохимия. - 1990. - №5.

Климчук А.Б. Гидрогеологические условия развития и генезис карстовых полостей в неогеновых сульфатных отложениях Вольно-Подольского артезианского бассейна. - Киев: Институт геол. Наук, 1999. - 25 с.

Климчук А.Б. Карстообразование в артезианских условиях: концепция поперечного спелеогенеза // Геологический журнал. - 2006. - №2-3. - С. 181 - 191.

Климчук А.Б., Андрейчук В.Н., Турчинов И.И. Структурные предпосылки спелеогенеза в гипсах Западной Украины. - Киев: 1995. - 104 с.

Andrejchuk V.N., Klimchouk A.B. Geomicrobiology and Redox Geochemistry of the Karstified Miocene Gypsum Aquifer, Western Ukraine: The study from Zoloushka Cave // Geomicrobiology. - Vol.18. - 2001.- No.3. - P. 275-295.

Asikainen, C.A., Werle, S.F. Accretion of ferromanganese nodules that form pavement in Second Connecticut Lake, New Hampshire // PNAS 104(45).- 2007. - P.17579-17581.

Boston, P.J., Hose, L.D., Northup, D.E., Spilde, M.N. . The microbial communities of sulfur caves: A newly appreciated geologically driven system on Earth and potential model for

Mars. In, R. Harmon, ed. Karst Geomorphology, Hydrology, & Geochemistry Geological Soc. Amer. Special Paper 404. - 2006. - P. 331-344.

Boston, P.J., Ivanov, M.V., McKay, C.P. On the possibility of chemosynthetic ecosystems in subsurface habitats on Mars. Icarus 95. - 1992. - P. 300-308.

Boston, P.J., Spilde, M.N., Northup, D.E., Curry, M.C., Melim, L.A., Rosales-Lagarde, L. Microorganisms as speleogenetic agents: Geochemical diversity but geomicrobial unity. In, A.B. Klimchouk & D.C. Ford, eds., Hypogene Speleogenesis and Karst Hydrology of Artesian Basins. Special Paper 1: Ukrainian Inst. Speleology & Karstology, Simferopol, Ukraine. - 2009. - P. 51-57.

Boston, P.J., Spilde, M.N., Northup, D.E., Melim, L.A., Soroka, D.S., Kleina, L.G., Lavoie, K.H., Hose, L.D., Mallory, L.M., Dahm, C.N., Crossey, L.J., Schelble, R.T. . Cave biosignature suites: Microbes, minerals and Mars. Astrobiology Journal 1(1).- 2001. - P. 25-55.

Cullimore, R., Johnston, L. Biodeterioration of the RMS Titanic. Can. Chem. News Mag. November / December 2000. - 2000.

Cunningham, K.I., Northup, D.E., Pollastro, R.M., Wright, W.G., LaRock, E.J. Bacteria, fungi, and biokarst in Lechuguilla Cave, Carlsbad Caverns National Park, NM. Environm. Geol. 25. - 1995. - P. 2-8.

Davis, D.G., Palmer, M.V., Palmer, A.N. Extraordinary subaqueous speleothems in Lechuguilla Cave, New Mexico: Nat. Speleo. Soc. Bull. 52(2).- 1990. -P.70-86.

Edwards, R.A., Rodriguez-Brito, B., Wegley, L., Haynes, M., Breitbart, M., Peterson, D.M., Saar, M.O., Alexander, S., Alexander, E.C., Rohwer, F. Using pyrosequencing to shed light on deep mine microbial ecology. BMC Genomics 7:57. - 2006.

Hawksworth, D. L. The fungal dimension of biodiversity: magnitude, significance, and conservation. Mycological Research 95. - 1991. - P.641-655.

Hawksworth, D. L., Kirk, P. M., Sutton, B. C., Pegler, D.N. Ainsworth and Bisby's Dictionary of the Fungi (8th Ed.). CAB International, Wallingford, United Kingdom. -1995.- 616p.

Hofman, B.A. Morphological biosignatures from subsurface environments: Recognition on planetary missions. Space Sci. Rev. 135. - 2008. - P. 245-254.

Hose, L.D., Pizarowicz, J.A.. Cueva de Villa Luz, Tabasco, Mexico: Reconnaissance study of an active sulfur spring cave and ecosystem. J. Cave Karst Stud. 61(1). - 1999. - P.13-21.

Hose, L.D., Palmer, A.N., Palmer, M.V., Northup, D.E., Boston, P.J., Duchene, H.R. Microbiology and geochemistry in a hydrogen sulphide-rich karst environment. Chemical Geology 169. - 2000. -P. 399-423.

Jones, E.B.G., Sakayaroj, J., Suetrong, S., Somrithipol, S., Pang, K.L.. Classification of marine Ascomycota, anamorphic taxa and Basidiomycota. Fungal Diversity, An International Journal of Mycology, vol. 35. - 2009. - 200 p.

Klimchouk A. Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and Morphogenetic Perspective. - Carlsbad: National Cave and Karst Research Institute, - 2007. - 106 p.

Klimchouk A.B. Speleogenesis of great gypsum mazes in the Western Ukraine. // Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers (ред. Klimchouk A.B. и др.). - Huntsville: Natl. Speleol. Soc. - 2000. - P. 261-273.

Klimchouk A.B., Yablokova N.L. Genesis of carbon dioxide of air in Ukrainian caves // Proc. of the 10 Int. Congress of Speleology. - 1990. - 3. - P. 800-801.

Klimchouk A.B., Yablokova N.L., Ol'shtynsky S.P. The regularities in the formation of gas composition of the air in the large karst caves of Podolia and Bukovina // Proc. of the 8th Intern. Congress of Speleology. - Bowling Green, USA. - 1981.

Laval, B., Cady, S.L., Pollack, J.C., McKay, C.P., Bird, J.S.,

- Grotzinger, J.P., Ford, D.C., Bohm, H.R. Modern freshwater microbialite analogues for ancient dendritic reef structures. *Nature* 407(6804). - 2000. – P.626-629.
- Lim, D.S.S., Laval, B.E., Slater, G., Antoniadis, D., Forrest, A.L., Pike, W., Pieters, R., Saffari, M., Reid, D., Schulze-Makuch, D., Andersen, D., McKay, C.P. Limnology of Pavilion Lake, B. C., Canada - Characterization of a microbialite forming environment. *Fund. Appl. Limnol.* 173(4). - 2009. – P. 329-351.
- Macalady, J.L., Jones, D.S., Lyon, E.H. Extremely acidic, pendulous cave wall biofilms from the Frasassi cave system, Italy. *Environm. Microbiol.* 9(6). - 2007. – P. 1402-1414.
- Maltsev V.A. Minerals of Cupp-Coutunn Cave. In, *Cave Minerals of The World*, 2nd edition. Carol Hill and Paolo Forti (Eds.), National Speleological Society, Huntsville, AL. -1997. – P. 323-328.
- Melim, L.A., Liesheidt, R., Northup, D.E., Spilde, M.N., Boston, P., Queen, J.M. A biosignature suite from cave pool precipitates, Cottonwood Cave, New Mexico. *Astrobiology*, - 2009. - In press.
- Melim, L.A., Northup, D.E., Spilde, M.N., Jones, B., Boston, P.J., Bixby, R.J., Reticulated filaments in cave pool speleothems: Microbe or mineral? *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 70.- 2008. – P.135-141.
- Northup, D.E., Barns, S.M., Yu, L.E., Spilde, M.N., Schelble, R.T., Dano, K.E., Crossey, L.J., Connolly, C.A., Boston, P.J., Natvig, D.O., Dahm, C.N. Diverse microbial communities inhabiting ferromanganese deposits in Lechuguilla and Spider Caves. *Environmental Microbiology* 5. – 2003. – P.1071-1086.
- Sommers, M.G., Dollhopf, M.E., Douglas, S.. Freshwater ferromanganese stromatolites from Lake Vermilion, Minnesota: Microbial culturing and environmental scanning electron microscopy investigations. *Geomicrobiology Journal* 19(4). – 2002. - P. 407-427.
- Spilde, M.N., Kooser, A., Boston, P.J., Northup, D.E. Speleosol: A subterranean soil. *Proceedings of the 15th International Congress of Speleology*, Vol. 1 , Kerrville, TX. - 2009. – P.338-344.
- Spilde, M.N., Northup, D.E., Boston, P.J., Schelble, R.T., Dano, K.E., Crossey, L.J., Dahm, C.N. Geomicrobiology of cave ferromanganese deposits. *Geomicrobio. J.* 22. - 2005. – P.99-116.
- Westall, F. Morphological biosignatures in early terrestrial and extraterrestrial materials. *Space Sci. Rev.* 135. - 2008. – P.95-114.
- Ziegler, S., Ackermann, S., Majzlan, J., Gescher, J. Matrix composition and community structure analysis of a novel bacterial pyrite leaching community. *Environm. Microbiol.* 11(9).- 2009. –P. 2329-2338.