

УДК 552.6

ФРАМБОИДАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ ЧЕРНЫХ СЛАНЦЕВ КЕМБРИЯ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ И ПЕРМИ ШЕЛЬФА БАРЕНЦЕВА МОРЯ

© 2005 г. М. М. Астафьева

Палеонтологический институт РАН

Поступила в редакцию 14.07.2003 г.

Принята к печати 13.01.2004 г.

Обсуждено происхождение фрамбоидальных структур и их минеральный состав на примере черных сланцев верхней перми шельфа Баренцева моря и кембрия Сибирской платформы. Подтверждено биогенное происхождение фрамбоидов черных сланцев.

Фрамбоиды – это сфероидальные агрегаты микрокристаллов, как правило, сложены пиритом, иногда марказитом, еще реже магнетитом и другими минералами. Для морфологии фрамбоидов характерны следующие признаки – шаровая форма, сложное сотовое внутреннее строение, монозернистость внутри отдельного глобуля. Размер фрамбоидов, как правило, не превышает 10 мкм, а размеры отдельных микрокристаллов, слагающих фрамбоиды, менее 1 мкм. Термин “фрамбоиды” произошел от французского “framboise” и впервые был предложен в 1935 г. для обозначения текстур, морфология которых напоминает ягоду малины.

Некоторые авторы считают, что морфологически фрамбоиды соответствуют спорангиям грибковых организмов и некоторым вирусам. Фрамбоиды могут быть представлены пиритом, гель-пиритом, пирротинном и органическим веществом. Встречаются и фрамбоиды лишь частично минерализованные пиритом. Наблюдается тесная пространственная связь фрамбоидального пирита с детритом захороненного органического вещества. Все вышеизложенное наводит этих авторов на мысль, что образование фрамбоидального пирита связано с преобразованием органического вещества (Богуш, Бурцев, 2002).

Существует градация фрамбоидальных структур по их размерам, в соответствии с которой выделяются микрофрамбоиды, фрамбоиды и полифрамбоиды. Шкала размеров и сложности фрамбоидальных структур, по-видимому, связана с их ростом.

Микрофрамбоиды, представляющие собой сферические формы, состоят из дискретных, практически равных нанокристаллов. Микрофрамбоиды структурно схожи с “нормальными” фрамбоидами, но их размер на порядок меньше и лежит в интервале от 0.1 до 1.0 мкм, т.е. соответствует размеру гранул или микрокристаллов, слагающих собственно фрамбоиды. Описаны микрофрамбо-

иды >0.2 мкм (Berner, 1969; Farrand, 1970), полученные в лабораторном эксперименте и микрофрамбоиды 0.7 мкм из пиритизированных диатомей глубоководных отложений (Schallreuter, 1984). Микрофрамбоиды сложены неправильными частицами, размером 50–100 нм (0.05–0.10 мкм). Иногда микрофрамбоиды, подобно обычным фрамбоидам, имеют тенденцию к ограниченности. Здесь стоит отметить, что средний размер частиц сульфидов железа, агрегаты которых обнаружены в магнитотактических бактериях (Mann et al., 1990; Farina et al., 1990), также имеют размер от 75 до 150 нм (0.075–0.150 мкм).

Большая часть известных фрамбоидов имеет размер от 5 до 20 мкм, однако изредка встречаются размером около 250 мкм (Sweeney, Kaplan, 1973), так же как и фрамбоиды размером 1 мкм. Размер же полифрамбоидов, сложенных обычными фрамбоидами, колеблется от 35 до 900 (в среднем 50–200) мкм. Все вышесказанное показывает, что размеры различных типов фрамбоидальных форм перекрываются. Фрамбоидальные агрегаты в диаметре около 60 мкм могут состоять как из фрамбоидов, так и из кристаллов, причем в первом случае это полифрамбоиды, а во втором – фрамбоиды (Sawlowicz, 1993).

Фрамбоиды широко распространены во многих осадочных породах различного возраста. Встречаются они также и в современных осадках болот, торфяников, в морских и океанических илах. Сомнений в том, что фрамбоиды формируются путем раскристаллизации аморфных сульфидов железа, образующихся на ранних стадиях диагенеза в локальных очагах сероводородного заражения, не возникает.

Наиболее широко распространен фрамбоидальный пирит, который не имеет аналогий с другими известными формами пирита. Образование фрамбоидального пирита считается обусловленным деятельностью сульфатредуцирующих бактерий (СРБ) (Герасименко, Заварзин, 1993). При-

чем о биогенном его происхождении можно говорить достаточно уверенно, хотя доказана и возможность абиогенного осаждения сульфидов железа (Kohn et al., 1998). Однако это не дает оснований для отрицания биогенности происхождения фрамбоидов, поскольку практически все соединения, считающиеся биологическими, в том числе и белковые аминокислоты, могут синтезироваться абиогенным путем (Юшкин, 2000). Экспериментально доказано, что почти все аминокислоты, входящие в состав природных белков, можно получить в лабораторных условиях. Таким образом, химический синтез биологически важных соединений (мономеров и полимеров), которые служат исходным материалом для построения всех организмов, возможен (Гусев, Минеева, 1992). Однако биологическая природа таких органических соединений, как аминокислоты и полипептиды, дискуссий не вызывает.

Роль бактерий в осаждении сульфидов, по крайней мере, в морских условиях, крайне велика, поскольку для осаждения сульфидов железа требуются высокие концентрации сероводорода, а в морских осадках быстрое увеличение его содержания с глубиной является прямым результатом восстановления сульфатов бактериями (Kohn et al., 1998).

Косвенным подтверждением биогенности фрамбоидальных сульфидов может служить и тот факт, что они чаще встречаются как псевдоморфозы по раковинам фораминифер, чем просто распространенные в осадке. Эта пространственная связь с источником углерода, скорее всего, вызвана микробиальным разложением органического вещества, поскольку известно, что ионы металлов гораздо более реактивны по отношению к растворенным сульфидам, когда они адсорбированы на стенках клеток, чем к сульфидам, находящимся в растворе. Таким образом, стенки клеток СРБ, вероятно, являются местом образования микрокристаллов сульфидов металлов, которые затем образуют фрамбоиды (Kohn et al., 1998).

Все вышесказанное говорит о том, что осаждение фрамбоидального пирита индуцируется биологически, т.е. можно говорить о биогенности его происхождения.

Кроме того, некоторыми авторами (Taylor, 1983) высказывается предположение о возможной роли магнитотактических бактерий в образовании фрамбоидов. Эта роль обусловлена наличием магнитного материала в клетках магнитотактических бактерий, причем количество магнитных частиц связано с доступностью растворенного железа. Предполагается, что после смерти подобных бактерий разложение органического материала приводит к накоплению магнитных частиц, которые аккумулируются, образуя фрамбоидоподобные агрегаты.

Ископаемые биоморфные микроструктуры, в том числе и фрамбоидальные, как правило, широко распространены в породах с повышенным содержанием органических веществ, т.е. в высокоуглеродистых горных породах. В качестве объекта исследования были выбраны черные карбонатные сланцы куонамской и огоньорской свит кембрия Сибирской платформы. Разрезы обеих свит приурочены к Юдомо-Оленекскому фациальному региону.

Выходы пород огоньорской свиты расположены в нижнем течении р. Лены, прорезающей систему Хараулахских гор (Чекуровская и Булкурская антиклинали). Для пород огоньорской свиты характерно тонкое и ритмичное переслаивание известняков плитчатых, часто глинистых, аргиллитов, алевролитов коричневатого-, темно- и зеленоватого-серых. Возраст свиты – средний кембрий (майский и аксайский ярусы) – нижний? ордовик (тремадокский ярус) (Кембрий Сибири, 1992).

Куонамская свита в своем наиболее полном разрезе состоит из 7 пачек (Кембрий Сибири, 1992), представленных чередованием различных аргиллитов, мергелей и известняков; породы как известковистые, так и кремнистые и сапропелитовые. Возраст свиты от нижнего (ботомский ярус) до среднего (амгинский ярус) кембрия. Разрезы куонамской свиты вскрываются на юго-западном склоне Оленекского поднятия, в бассейне нижнего течения р. Оленек.

Нами были исследованы образцы пород нижней части огоньорской свиты (граница среднего-верхнего кембрия), отобранные Г.Т. Ушатинской (Хараулах, левобережье низовой р. Лена, 4 км ниже пос. Чекуровка), а также образцы пород куонамской свиты, переданные Е.А. Жегалло (сборы Ю.Н. Занина) и Э.А. Егановым (левобережье р. Лены, рр. Малая Куонамка и Мойеро).

Кроме того были изучены образцы пород из керна скважин, пробуренных Мингазпромом СССР на шельфе Баренцева моря: Северо-Кильдинской-82 (в юго-западной части Баренцева моря) и Адмиралтейской-1 (в восточной части Баренцева моря, вблизи Новой Земли). Это верхнепермские черные, вероятно, посидониевые сланцы. Посидониевые сланцы – это своеобразные фации битуминозных, ламинированных карбонатных сланцев и плитчатых известняков, насыщенные остатками раковин двустворчатых моллюсков рода *Posidonia*. Предполагается, что подобные осадки могли накапливаться в относительно тихих водах ниже уровня волновой эрозии, причем седиментация должна была быть достаточно быстрой, чтобы предотвратить полное разрушение органического детрита некрофагами (Newell, 1955). Образцы были переданы автору сотрудниками ВНИИОкеангеология В.И. Устрицким, Н.В. Устиновым, Э.Н. Преображенской и Т.М. Пчелиной.

Все образцы изучались на электронном сканирующем микроскопе CamScan-4. Химические анализы выполнялись микрозондом. Для исключения современного бактериального заражения образцы протравливались перекисью водорода в течение получаса и просушивались в муфельной печи.

Фрамбоиды исследованных пород многочисленны, диаметр их от 3 до 10 мкм (табл. I, см. вклейку). Встреченные фрамбоиды, как правило, представляют единое целое с породой, являясь как бы ее составной частью. Причем часто создается впечатление, что порода буквально сложена фрамбоидами и отдельные ее прослои состоят практически только из фрамбоидов (табл. I). Поэтому сомнений в том, что фрамбоиды находятся *in situ*, т.е. были образованы одновременно с породой, не возникает.

Тем не менее, встреченные фрамбоиды существенно отличаются по своему составу. Большая часть фрамбоидов сложена серой и железом (рис. 1), т.е. представлена, скорее всего, пиритом. Считается, что образование фрамбоидного пирита обусловлено деятельностью СРБ (Герасименко, Заварзин, 1993).

Деятельность СРБ приурочена к анаэробной зоне, т.е. происходит в отсутствие кислорода. Однако судить о глубине бассейна только по наличию в нем СРБ не представляется возможным, поскольку, например, даже верхний слой цианобактериального мата толщиной в несколько миллиметров создает под ним анаэробные условия, благоприятные для развития СРБ. Фактором, ограничивающим развитие подобных сообществ, является поступление сульфата извне. Регенерация же сульфата возможна, во-первых, окислением сероводорода в аэробных условиях и, во-вторых, анаэробным окислением сероводорода до сульфата. В целом же сульфидогенные сообщества играют очень большую роль в морских условиях и большая часть органического вещества в донных осадках разлагается подобным образом (Заварзин, Колотилова, 2001).

Среди фрамбоидов сульфидов железа встречены фрамбоиды, морфологически неотличимые от фрамбоидов пирита, но в химическом составе которых отсутствует сера (рис. 2). Поскольку фрамбоидальные структуры изредка бывают сложены и магнетитом, можно предположить, что эти фрамбоиды имеют магнетитовую природу. Бактериальный магнетит может быть образован двумя путями. Во-первых, посредством биологически индуцированной минерализации, при которой процессы биоминерализации организмы не контролируются, а минеральные частицы образуются внеклеточно. В этом случае магнетит образуется в результате жизнедеятельности термофильных и умереннотермофильных железоре-

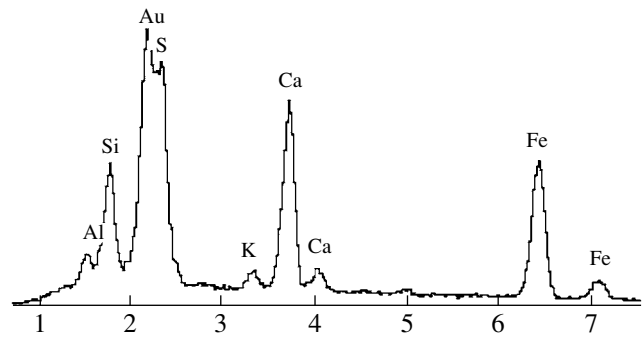


Рис. 1. График, показывающий химический состав фрамбоидов, в химическом составе которых присутствует сера.

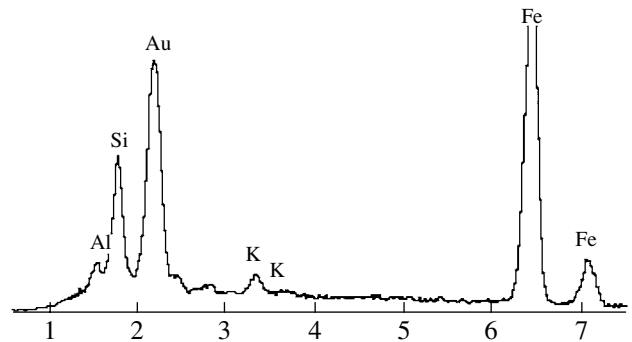


Рис. 2. График, показывающий химический состав фрамбоидов, в химическом составе которых сера отсутствует.

дуцирующих бактерий в анаэробных условиях, причем на его образование сильно влияют такие параметры среды как Eh и pH. В этом случае магнетит является конечным продуктом жизнедеятельности этих бактерий.

Однако магнетит может быть образован и биологически контролируемой минерализацией, при которой минералы отлагаются на или внутри органической матрицы, или пузырьков внутри клетки, причем организм до известной степени контролирует минералообразование. Поскольку внутриклеточные pH и Eh определяются самим организмом, образование минералов в этом случае, в меньшей степени, зависит от параметров окружающей среды. Магнитные частицы магнетита при минерализации такого рода образуются магнитотактическими бактериями. Структуры, аналогичные фрамбоидальной, образуются множественным двойникованием, которое связывают с ростом бактерий, а не с фазовыми переходами или внешними воздействиями, которыми обычно бывает обусловлено двойникование (Devouagard et al., 1998; Zhang et al., 1998). Следует отметить, что магнетит потенциально может слу-

жить физическим индикатором биологической активности.

Однако железистые фрамбоиды, лишенные серы, могут быть представлены не только магнетитом. Известно, что многие сульфиды железа, такие как пирит (FeS_2), макинавит (FeS_{1-x}) и аморфное FeS , метастабильны (т.е. устойчивы по отношению к слабым внешним воздействиям, но при значительном воздействии способны к реакциям с изменением энергетического уровня в типично окислительных земных условиях и поэтому редко встречаются вне микробных анаэробных условий (Boston et al., 2001). Поскольку известны прекрасные псевдоморфозы гематита по пириту (Lougheed, Mancuso, 1973; Годовиков, 1975), можно предположить, что в результате окисления фрамбоидного пирита гематит (окисное железо) образовал псевдоморфозы по фрамбоидам пирита. Гематит может образовываться различными путями, но всегда при достаточно высоких значениях Eh. Более высоким окислительно-восстановительным потенциалом, чем морские воды, обладают поверхностные пресные воды (речные и, особенно, дождевые) (Мейсон, 1971). Таким образом, окисление пирита связано с увеличением окислительно-восстановительного потенциала (Eh). Образование гематита может также быть связано и со смешением пресных вод (со значительным количеством Fe^{2+} при pH около 7 или чуть ниже) с морскими, находящимися в равновесии с кальцитом. При этом происходит выделение гематита в виде оолитов и псевдоморфоз по органическим остаткам (Заварзин, Колодилова, 2001).

Однако, в изученных образцах обнаружены одновременно как классические фрамбоиды пирита, так и фрамбоиды, в элементном составе которых отсутствует сера (рис. 2). Поэтому можно сделать вывод о локальном образовании гематита. Аналогичная ситуация наблюдается и в многочисленных железистых прослоях формации Negaunee (Мичиган), в которых фрамбоиды предположительно гематита встречаются одновременно с фрамбоидами пирита (Lougheed, Mancuso, 1973).

Процесс окисления пирита вероятнее всего мог происходить не в подводных условиях (в аэробной окислительной зоне – в этом случае окисление должно было затронуть весь слой), а при фильтрации поверхностных вод через породу, содержащую фрамбоиды пирита.

Окислы железа, в том числе и гематит, нестабильны и подвержены разрушению. Поэтому условия, при которых происходило окисление, должны были быть либо кратковременными и довольно быстро вновь смениться на восстановительные, либо должна была сформироваться водонепроницаемая порода, проникновение в массив которой фильтрующихся поверхностных вод

было практически невозможным. Фильтрация поверхностных вод возможна лишь до тех пор, пока породы остаются водопроницаемыми, как только водопроницаемость уменьшается, породы приобретают водонепроницаемые свойства, превращаются в водоупор, и, соответственно, прекращается окисление и разрушение фрамбоидов. Мало того, процесс вымывания сульфат-ионов, образующихся в результате окисления сульфидов железа, не должен был быть слишком интенсивным, чтобы не нарушить саму структуру фрамбоидов. При этом время, когда происходил этот процесс, не определено, можно лишь сказать, что окисление произошло уже после образования фрамбоидального пирита.

Как видно, второе объяснение гораздо сложнее первого. Мы склонны отдать предпочтение более простой версии, т.е. магнетитовой природе фрамбоидов, лишенных серы. Совместное же нахождение фрамбоидов пирита и фрамбоидов без серы может быть объяснено некоторым дефицитом сульфат-иона в бассейне осадконакопления. Кроме того, и пирит, и магнетит образуются, как правило, в тепловодных бассейнах. К тому же, по всей видимости, нельзя полностью исключить и совместную жизнедеятельность сульфат- и железоредуцирующих бактерий.

Кроме хорошо оформленных фрамбоидов в исследованных образцах изредка встречаются остатки расплюснутых нитевидных бактерий. Филаменты, по-видимому, неветвящиеся с постоянным диаметром 2–3 мкм, длина которых может превышать 100 мкм. Эти расплюснутые нити могут быть отнесены как к цианобактериям, так и к любым другим нитчатым бактериям.

Образование сероводорода часто создает особые экологические условия, получившие название “сульфуреты”, где обитает целый мир тиофильных организмов, вплоть до песпозвоночных. Для удаления сероводорода из подобных систем существует два пути. Первый, химический, заключается в связывании сероводорода (H_2S) в нерастворимые сульфиды, в первую очередь, в черные сульфиды железа, гидротроиллит, который затем переходит в пирит, что и происходит, вероятно, в нашем случае. Второй путь, биологический, обусловлен миграцией H_2S в поверхностные слои, где он окисляется бактериями (Заварзин, 1984, с. 83–84). Геологический круговорот серы с образованием S_0 и сульфидов металлов замыкается биологическим окислением тионовыми бактериями, создающими кислую среду, например, *Thiobacillus ferrooxidans* или их синтрофными ассоциациями. Он приводит к выщелачиванию горных пород и по сути может рассматриваться как прямая цепь, а не циклический процесс. Однако выпадение из цикла серы в виде сульфидов металлов приводит к истощению сульфатов, как это

наблюдается в донных отложениях океана, и к останковке серного цикла (Заварзин, 1984, с. 85).

В изученных интервалах разрезов присутствует и ископаемая бентосная фауна – в кембрийских интервалах это трилобиты и брахиоподы, а в верхнепермских – двустворчатые моллюски. Однако почти во всех случаях участки пород с остатками бентоса практически лишены остатков бактериальных микроструктур, во фрагментах же, обогащенных бактериоморфными структурами, отсутствуют остатки бентосной макрофауны. Это, вероятно, говорит о неравномерности микробиальной переработки органических веществ и служит косвенным подтверждением биологической (бактериальной) природы наших микроструктур.

Исключение – находки двустворчатых моллюсков *Posidonia* в верхнепермских черных сланцах шельфа Баренцева моря. Их остатки отмечены во многих образцах, причем, по всей видимости, фрамбоиды пирита наилучшей сохранности приурочены к интервалам с посидониями. Посидонии – своеобразные чрезвычайно тонкостенные уплощенные двустворчатые моллюски, хрупкие створки которых обычны в черных сланцах позднего палеозоя и раннего мезозоя и характеризуют определенные фации. Обычно они встречаются в битуминозных глинистых осадках, содержащих растительный детрит, остатки рыб и цефалопод. Бентосные формы, такие как брахиоподы, мшанки и кораллы, обычно отсутствуют в посидониевых фациях. Интересно, что в посидониевых слоях Гренландии присутствуют тонкие интеркаляции темных известняков, содержащих брахиоподы и мшанки (*Productuskalk facies*). Однако, особи посидоний в этих фациях редки. Обычные ассоциаты в типично посидониевых сланцах – многочисленные остатки посидоний, рыб, белемнитовых ростров и крючков. С раковинами посидоний связаны и фрагменты неопределимых растений. Легкость раковины посидоний и их обычные ассоциаты предполагают псевдопланктонный образ жизни. Возможно, эти формы жили, прикрепляясь биссусом к плавающим растениям. Чрезвычайная тонкость створок посидоний гармонирует с этим предположением. Кроме того, на протяжении всей своей истории развития (миссисипий – юра) виды посидоний обычно ограничены темными сланцами, как правило, содержащими такие пелагические формы, как рыбы и цефалоподы. Считается, что темный цвет подобных отложений обусловлен битуминозным материалом, сохраненным, вероятно, в восстановительных условиях. Седиментация посидониевых сланцев, по всей видимости, происходила в бассейне с застойными водами, низким содержанием кислорода и высоким – сероводорода (Newell, 1955), что прекрасно согласуется с данными, полученными при анализе микробиальных остатков этих отложений.

В заключение можно сказать, что образование фрамбоидальных структур связано с бактериальной переработкой и последующей минерализацией органического вещества. По крайней мере, в морских условиях осаждение фрамбоидальных структур связано с жизнедеятельностью бактерий. Причем образование фрамбоидов возможно двумя путями – как посредством биологически индуцированной, так и биологически контролируемой минерализации, т.е. можно говорить о биогенности их происхождения. Минеральный состав фрамбоидов варьирует. Преобладают фрамбоиды сульфидов железа, в основном, предположительно, пирита. Реже фрамбоиды бывают сложены магнетитом и, возможно, гематитом.

Автор признателен всем, кто помогал в проведении этой работы – А.Ю. Розанову, Е.А. Жегалло, Г.Т. Ушатинской, Л.М. Герасименко, В.И. Устрицкому, Э.А. Еганову, Н.П. Юшкину за обсуждение результатов и предоставленные материалы, Л.Т. Протасевичу и А.В. Кравцову за помощь при работе на электронном сканирующем микроскопе.

Работа выполнена по Программе Президиума РАН “Возникновение и эволюция биосферы”, подпрограмма II (“Возникновение жизни и эволюция геобиологических систем”) и при поддержке грантами РФФИ №№ НШ-974.2003.5; 02-04-48094; 03.05-64499.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Богуш И.А., Бурцев А.А.* Онтогенез фрамбоидального пирита // Биокосные взаимодействия: Жизнь и камень. Матер. I Междунар. симпоз. СПб., 2002. С. 49–51.
- Герасименко Л.М., Заварзин Г.А.* Реликтовые циано-бактериальные сообщества // Проблемы доантропогенной эволюции биосферы. М.: Наука, 1993. С. 222–253.
- Годовиков А.А.* Минералогия. М.: Недра, 1975. 520 с.
- Гусев М.В., Минеева Л.А.* Микробиология. М.: Изд-во МГУ, 1992. 448 с.
- Заварзин Г.А.* Бактерии и состав атмосферы. М.: Наука, 1984. 192 с.
- Заварзин Г.А., Колотилова Н.Н.* Введение в природоведческую микробиологию. М.: Книжный дом “Университет”, 2001. 256 с.
- Кембрий Сибири. Новосибирск: ВО “Наука”, 1992. 135 с. (Тр. Ин-та геол. и геофиз. СО РАН. Вып. 788).
- Мейсон Б.* Основы геохимии. М.: Недра, 1971. 312 с.
- Юшкин Н.П.* Биоминеральные гомологии и организмомобиоз // Минералогия и жизнь: биоминеральные гомологии. Сыктывкар: Геопринт, 2000. С. 9–10.
- Berner R.A.* The synthesis of framboidal pyrite // *Econom. Geol.* 1969. V. 64. P. 383–384.
- Boston P.J., Spilde M.N., Northup D.E. et al.* Cave biosignature suites: microbes, minerals, and Mars // *Astrobiol.* 2001. V. 1. P. 25–55.
- Devouagard B., Posfai M., Xin Hua et al.* Magnetite from magnetotactic bacteria: size distributions and twinning // *Amer. Mineralogist.* 1998. V. 83. P. 1387–1398.

- Farina M., Esquivel D.M.S., Lins de Barros H.G.P.* Magnetic iron-sulphur crystals from a magnetotactic microorganism // *Nature*. 1990. V. 343. P. 256–258.
- Farrand M.* Framboidal sulfides precipitated synthetically // *Mineral. Deposita*. 1970. V. 5. P. 237–247.
- Kohn M.J., Riciputi L.R., Orange D.L.* Sulfur isotope variability in biogenic pyrite: reflections of heterogeneous bacterial colonization? // *Amer. Mineralogist*. 1998. V. 83. P. 1454–1468.
- Lougheed M.S., Mancuso J.J.* Hematite framboids in the Nagaunee Iron formation, Michigan: Evidence for their biogenic origin // *Econom. Geol.* 1973. V. 68. P. 202–209.
- Mann S., Sparks N.H.C., Frankel R.B. et al.* Biomineralization of ferrimagnetic greigite (Fe₃S₄) and iron pyrite (FeS₂) in a magnetotactic bacterium // *Nature*. 1990. V. 343. P. 258–261.
- Newell N.D.* Permian pelecypods of East Greenland // *Medd. Grønland*. 1955. Bd 110. № 4. 36 p.
- Sawlowicz Z.* Pyrite framboids and their development: a new conceptual mechanism // *Geol. Rundsch.* 1993. V. 82. P. 148–156.
- Schallreuther R.* Framboidal pyrite in deep-sea sediments // *Unit. Rep. DSDP*. 1984. V. 75. P. 875–891.
- Sweeney R.E., Kaplan I.R.* Pyrite framboid formation: laboratory synthesis and marine sediments // *Econom. Geol.* 1973. V. 68. P. 618–634.
- Taylor G.R.* A Mechanism for framboid formation – the role of bacteria // *Mineral. Deposita*. 1983. V. 18. P. 129–130.
- Zhang Chuanlun, Vali H., Romanek Ch.H. et al.* Formation of single-domain magnetite by a thermophilic bacterium // *Amer. Mineralogist*. 1998. V. 83. P. 1409–1418.

Объяснение к таблице I

Фиг. 1, 2. Фрамбоиды из верхнепермских черных посидониевых сланцев шельфа Баренцева моря (фрамбоиды содержат серу).

Фиг. 3, 4. Фрамбоиды из черных сланцев огоньорской свиты Сибирской платформы: 3 – в химическом составе фрамбоида сера присутствует; 4 – сера отсутствует.

Фиг. 5, 6. Фрамбоиды из черных сланцев синской свиты Сибирской платформы.

Framboidal Structures of Black Shales from the Cambrian of the Siberian Platform and the Permian of the Barents Sea Shelf

M. M. Astafieva

The origin of framboidal structures and their mineral composition (based on the black shales of the Upper Permian of the Barents Sea shelf and the Cambrian of the Siberian Platform) is discussed. The biogenic origin of framboids from black shales is confirmed.

