

УДК 552.6

ФРАМБОИДЫ: ИХ СТРУКТУРА И ПРОИСХОЖДЕНИЕ

© 2005 г. М. М. Астафьева, А. Ю. Розанов, Р. Хувер

Палеонтологический институт РАН

Лаборатория космических наук, Центр космических полетов Дж. Маршалла, Хантсвилл, Алабама, США

E-mail: astafieva@paleo.ru

Поступила в редакцию 04.06.2004

Принята к печати 27.09.2004 г.

Фрамбоидальные структуры обычны как для земных пород, так и для метеоритов – карбонатных хондритов. Обсуждаются основные способы образования их. Оценивается роль биогенного фактора в образовании фрамбоидов. Проведено сравнение кристаллитов, слагающих фрамбоиды в природе и полученных в лабораторных условиях. Сделано предположение о типичности пиритоэдрической и икосаэдрической формы кристаллов для образования биогенных фрамбоидальных структур.

Как известно, образование фрамбоидальных структур связано с бактериальной переработкой и последующей минерализацией органического вещества (Taylor, 1983; Герасименко, Заварзин, 1993; Kohn et al., 1998; Заварзин, Колотилова, 2001; Богущ, Бурцев, 2002; Астафьева, 2005). По крайней мере, в морских условиях образование фрамбоидальных структур связано с жизнедеятельностью бактерий, которое возможно как посредством биологически индуцированной, так и биологически контролируемой минерализации. Минеральный состав фрамбоидов варьирует. Преобладают фрамбоиды сульфидов железа, в основном пирита, реже они сложены магнетитом и, возможно, гематитом.

Фрамбоиды являются доминирующей формой пирита в современных илистых морских или озерных отложениях и осадках соленых болот, образующихся в аноксических условиях, а также в водной массе современных аноксических бассейнов (Wilkin, Barnes, 1997b). Фрамбоидальный пирит обнаружен в породах различного геологического возраста, начиная с протерозоя, а именно: в карбонатах, аргиллитах, глинистых сланцах, углях, металлических сингенетических сульфидных отложениях, гидротермальных жилах, а также в вулканиках и даже в пляжном песке (Sunagawa et al., 1971; Sawlowicz, 1993); мало того, высказывается предположение о существовании микронитов со строго анаэробными условиями в окисленных поверхностных слоях прибрежных морских отложений и слое морской воды. Подобные микрониты связаны с частицами детрита и осадочными пеллетами. Их наличие объясняет присутствие сульфатредуцирующих (*Desulfofibrillum* spp.) и серных (*Beggiatoa*) бактерий, сульфидов железа и пирита даже в окисленных отложениях (Jorgensen, 1977).

Фрамбоидальный пирит образуется, как правило, в осадке на стадии раннего диагенеза (Berner,

1984; Berner, Westrich, 1985). Однако образование его возможно и в водной массе, как, например, в Черном море, фьорде Фрамварен (Норвегия) и эстуарии р. Петтаквамскат. Некоторые авторы полагают, что образование фрамбоидального пирита в водной массе приурочено к пограничной области между кислородной и аноксической зонами, с высокой степенью перенасыщения по отношению к пириту и небольшой степенью перенасыщенности по отношению к моносulfидам железа (Wilkin, Barnes, 1997b). Факторы, обуславливающие образование пирита, включают наличие органического вещества, пригодного для бактериального разложения, серы или растворенного сульфата и реактивного железа (минералов железа, вступающих в реакцию с H_2S). Интересно, что в нормально морских отложениях основной фактор, контролирующей образование пирита, это наличие железа и органического вещества, а в пресноводных осадках – доступность растворенного сульфата (Berner et al., 1979; Skei, 1988).

Однако, несмотря на широкое распространение фрамбоидальных структур и многочисленные полевые и экспериментальные исследования, до сих пор нет общепринятого мнения о механизме образования фрамбоидов (Farrand, 1970; Sunagawa et al., 1971; Кизильштейн, Минаева, 1972; Taylor, 1983; Wilkin, Barnes, 1997a; Кизильштейн, 1998; Ohfuji, Akai, 2002; Астафьева, 2005).

В качестве объекта исследования при проведении этой работы были выбраны черные, предположительно высокоуглеродистые, сланцы из различных регионов России. Каменный материал из синской свиты (нижний кембрий) Сибирской платформы был любезно предоставлен А.Ю. Иванцовым; были исследованы также образцы пород из нижней части огоньорской свиты (граница среднего–верхнего кембрия), отобранные Г.Т. Ушатинской, из куонамской свиты (нижний кембрий)

Сибирской платформы, переданные Е.А. Жегалло (сборы Ю.Н. Занина) и Э.А. Егановым; из верхнепермских, вероятно, сидониевых сланцев, вскрытых скважинами Мингазпрома 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), переданные сотрудниками ВНИИОкеангеология В.И. Устрицким, Н.В. Устиновым, Э.Н. Преображенской и Т.М. Пчелиной. Привлечены также и литературные источники.

Все образцы изучались на электронном сканирующем микроскопе CamScan-4. Химические анализы выполнялись микрозондом. Для исключения современного бактериального заражения образцы протравливались перекисью водорода в течение полчаса и просушивались в муфельной печи. Часть образцов из Северо-Кильдинской и Адмиралтейской скважин была просмотрена в лаборатории NASA (США).

Фрамбоиды в изученных нами породах многочисленны и, 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 них (табл. I, фиг. 1; табл. II, фиг. 1–4, см. вклейку). Поэтому сомнений в том, что фрамбоиды находятся *in situ*, т.е. были образованы одновременно с породой, не возникает.

Фрамбоидаые структуры, обнаруженные нами в керне скважин шельфа Баренцева моря, выражены, как правило, более отчетливо. Они представлены как отдельными хорошо оформленными фрамбоидами (табл. I, фиг. 1–4, 6), так и россыпями кристаллитов, слагающих фрамбоиды (табл. I, фиг. 5). Размеры отдельных фрамбоидов в основном порядка 5 мкм. В кристаллографическом отношении большая часть кристаллитов представлена октаэдрами, присутствуют также тетраэдры и кристаллиты пятиугольной формы (табл. I, фиг. 2). Интересно отметить, что фрамбоиды и слагающие их кристаллиты, обнаруженные в керне скважины Адмиралтейская-1, более размытых, округлых очертаний (рис. 1), чем фрамбоиды из Северо-Кильдинской скважины 82.

Фрамбоиды из кембрия Восточной Сибири (синская, куонамская и огоньорская свиты) имеют более четко выраженную пентагональную конструкцию, можно сказать, что их форма приближается к пентагон-додекаэдру, или пиритоэдру (табл. II, фиг. 1, 3, 6). Размеры этих фрамбоидов также порядка 5 мкм. Форма кристаллитов, из которых состоят кембрийские фрамбоиды, преимущественно пятиугольная, октаэдры играют второстепенную роль (табл. II, фиг. 5, 6).

Особо следует подчеркнуть отсутствие фрамбоидов кубической формы и кубических кристаллитов.

Итак, в черных сланцах кембрия и перми нами встречены многочисленные фрамбоидаальные структуры размером от 2 до 10 мкм. Они сложены, как правило, кристаллитами пиритоэдрической или октаэдрической формы, размер которых около 0.5 мкм, но может достигать и 2 мкм. Такой же размер и характер фрамбоидаальных структур (кристаллиты в форме октаэдров и пиритоэдров при отсутствии кубических кристаллитов) отмечен и в глинистых известняках нижнего карбона Ирландии (Morrissey, 1972).

Встречены также и фрамбоиды пирита с кристаллами в форме икосаэдра в глинистых миоценовых–современных осадках Японии (Ohfuji, Akai, 2002). Это очень интересная находка, поскольку различные срезы данных фрамбоидов из различных местонахождений при просмотре на сканирующем микроскопе имеют пятиугольную (пентагональную) и треугольную форму. Эти кристаллиты можно рассматривать как входящие в состав фрамбоида в форме икосаэдра, поскольку икосаэдр состоит из двадцати тетраэдров, и при сечении икосаэдра по определенной плоскости можно получить пятиугольник. К тому же при правильном расположении октаэдров также можно получить икосаэдр, так как октаэдр можно, в свою очередь, рассматривать состоящим из тетраэдров. Мало того, фрамбоиды в форме икосаэдров большей частью состоят именно из кристаллитов октаэдрической формы.

Икосаэдр имеет шесть осей симметрии 5-го порядка у каждой вершины и десять осей симметрии 3-го порядка. Таким образом, при различном сечении икосаэдра мы можем получить как пяти-, так и треугольные формы. Подобные формы кристаллитов довольно часто встречаются в исследованных нами образцах (табл. I, фиг. 2, 4, 6; табл. II, фиг. 3, 5, 6). К тому же, некоторые кристаллиты зачастую обманчиво выглядят прямоугольниками, хотя в действительности они являются октаэдрами – при взгляде со стороны вершины, в которой сходятся четыре треугольные грани (табл. I, фиг. 5; табл. II, фиг. 5).

Таким образом, обнаруженные нами октаэдрические кристаллиты, как и тетраэдрические и, казалось бы, квадратные, с большой долей вероятности можно рассматривать как составные части фрамбоидов икосаэдрической формы. При этом пентагон додекаэдрическая форма фрамбоидов не исключается. Об этом говорит нахождение кристаллитов соответствующей формы.

Икосаэдры довольно широко распространены в живой природе. Такую форму имеют некоторые радиолярии (Haesckel, 1904 in Ohfuji, Akai, 2002), вирусы (Horne et al., 1959 in Ohfuji, Akai,

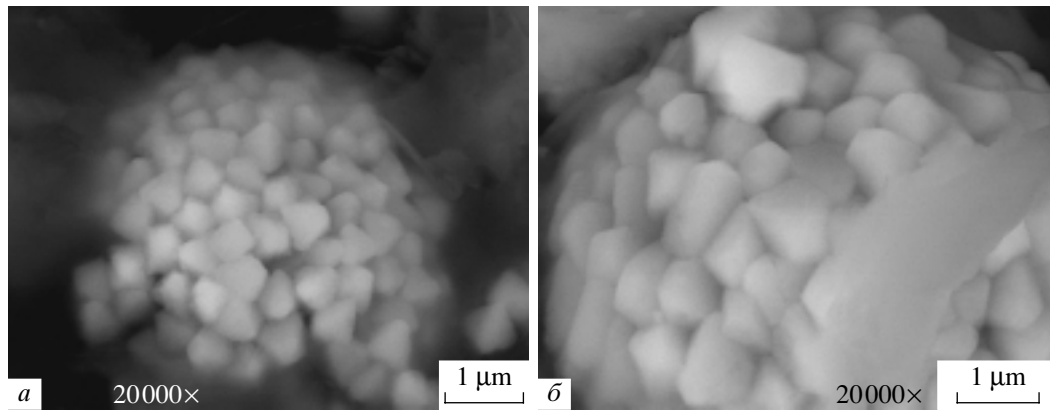


Рис. 1. Фрамбоиды из черных сланцев верхней перми шельфа Баренцева моря (скважина Адмиралтейская-1); экземпляры хранятся в Лаборатории космических наук Центра космических полетов Дж. Маршалла в Хантсвилле, штат Алабама, США.

2002) и даже фуллерены C_{60} , C_{70} (Kroto et al., 1985 in Ohfujii, Akai, 2002).

Здесь интересно отметить, что кристаллы фрамбоидального пирита, образованного в условиях лабораторного эксперимента, имеют более широкий диапазон кристаллографических модификаций: кубические – октаэдрические – пиритоэдрические (пентагон-додекаэдрические). Это наводит на мысль о существенном влиянии среды (включая биологический фактор) на кристаллографическую форму образовавшегося пирита, т.е. о зависимости кристаллографических модификаций фрамбоидов от внешней среды, а следовательно, и о критериях определения биогенности встречаемых фрамбоидальных структур. Первой попыткой решения этого вопроса и является данная статья.

В лабораторных условиях фрамбоидальный пирит был получен при различных температурах, как ниже $100^{\circ}C$ (Berner, 1969; Farrand, 1970; Sweeney, Kaplan, 1973; Kribek, 1975), так и выше 100° (Sunagawa et al., 1971; Graham, Omoto, 1994), причем некоторые исследователи получали фрамбоидальный пирит при температурах до 500° (Murowchick, Barnes, 1987).

В этих исследованиях использовались различные экспериментальные методы, которые позволили некоторым авторам сделать вывод о том, что образование пирита с фрамбоидальной морфологией напрямую не зависит от биологической активности бактерий. И хотя сульфатредуцирующие бактерии и производят сероводород, который может быть связан в сульфиды железа, эти бактерии, очевидно, не влияют на морфологию образовавшегося пирита. Следующий вывод заключается в том, что сферическая форма, характерная для многих фрамбоидов пирита, скорее является результатом фрамбоидообразующих про-

цессов, чем псевдоморфозами по сферическому предшествующему субстрату (Wilkin, Barnes, 1997a).

Следует отметить, что во многих тщательно проведенных экспериментах по образованию пирита фрамбоиды так и не были получены (Sweeney, Kaplan, 1973). Это удивительно, поскольку в природных условиях фрамбоиды широко распространены, и, вероятно, объясняется только тем, что начальные условия многих экспериментов существенно отличаются от природных, что, возможно, и приводит к различным скоростям и механизмам пиритизации (Wilkin, Barnes, 1997a).

К тому же фрамбоиды биогенного происхождения, судя по находкам в современных илах, характеризуются наличием вокруг них полупрозрачной органической оболочки (Федорова и др., 1988; Sawlowicz, 1993). Однако подобные чехлы или наружные мембраны в лабораторных условиях получить ни разу не удалось (Sweeney, Kaplan, 1973). Это косвенно подтверждает вывод предыдущих авторов о различных механизмах пиритизации в естественных и лабораторных условиях.

Мало того, как известно, клеточная стенка прокариот снаружи часто бывает окружена слизистым веществом. Подобные образования в зависимости от структурных особенностей получили название капсул, слизистых слоев или чехлов. Все они являются результатом синтеза прокариотами органических полимеров и отложения их вокруг клеток. Хотя капсулы, слизистые вещества и чехлы являются необязательными структурами прокариотной клетки, им приписывают определенные полезные для клетки функции. Вязкость внешней среды, обусловленная наличием слизистых веществ, обусловленная наличием слизистых веществ, определенно благоприятна для клетки. Они защищают клетку от механических повреждений, высыхания, создают дополнительный осмотический барьер, служат препятствием для проникновения фагов. Иногда слизистые об-

разования могут служить источником дополнительных питательных веществ. С помощью слизи осуществляется связь между клетками в колонии, а также происходит прикрепление клетки к различным поверхностям. Следует отметить, что капсулы, слизистые образования и чехлы могут содержать компоненты, одинаковые с клеточной стенкой, однако их химический состав не идентичен (Гусев, Минеева, 1992). Наличие подобного чехла у фрамбоидов, встречаемых в природных условиях, по нашему мнению, является подтверждением биогенности их происхождения.

Тем не менее, хотя возможность синтеза фрамбоидального пирита в чисто водных лабораторных системах была экспериментально доказана, нельзя недооценивать роль органических соединений в образовании и, особенно, в сохранении фрамбоидов в естественных условиях осадконакопления. Участие органики и продуктов ее разложения в образовании фрамбоидов, по всей видимости, заключается в следующем (Farrand, 1970). 1. Железо может выщелачиваться из осадка кислотным разложением продуктов и находиться в растворе в органических молекулах. 2. Биогенный сероводород обеспечивает присутствие растворенной серы и низкий уровень Eh. 3. Органические соединения, растворенные в воде, могут увеличивать вязкость среды и обеспечивать осаждение тонких сульфидов в большем диапазоне концентраций, чем это возможно в чистой воде. 4. Гидрофобные органические соединения могут обеспечивать агрегацию микрокристаллов вследствие увеличения поверхностного напряжения. 5. Те же самые соединения могут защищать фрамбоиды от разрушения. 6. В более позднем диагенезе органическое вещество может обеспечивать наличие серы, необходимой для перехода от троилита к пириту.

Таким образом, можно сказать, что при образовании фрамбоидов органическое вещество играет важную роль, хотя его присутствие и не является обязательным (Sawlowicz, 1993). В экспериментах, проводившихся без органических веществ, фрамбоиды большей частью образовывались агломерацией гранул (Sunagawa et al., 1971) и во избежание разрушения некоторое время после осаждения должны были быть изолированы от раствора (Farrand, 1970; Kriebek, 1975). Ограниченная устойчивость фрамбоидов в отсутствие органических веществ, вероятно, объясняет относительную редкость в природе фрамбоидов, кристаллизованных из неорганического геля сульфида железа. В тех экспериментах, в которых капельки геля были стабилизированы органическими веществами (Kriebek, 1975), фрамбоиды образовывались обособлением частиц и существовали относительно дольше.

Нет согласия среди специалистов не только по вопросу образования фрамбоидального пирита, но

и относительно образования фрамбоидов вообще, поскольку большинство предложенных гипотез действительно только при весьма специфических условиях окружающей среды. Для образования фрамбоидов пирита должны быть соблюдены два условия: наличие растворенного двухвалентного железа и серы (органического или неорганического происхождения). Эти условия выполняются в различных средах, особенно богатых органикой, причем необходимые для образования пирита растворенные органические сульфиды образуются разложением органического вещества сульфатредуцирующими бактериями, а растворенное железо связано с поровыми водами окружающего осадка (Raiswell et al., 1993). Следовательно, можно предположить, что образование пирита, как правило, является биологически индуцированным процессом между металлами и биологически образованным сероводородом. Темные карбонатные отложения (типичные вмещающие породы для фрамбоидов пирита) – идеальная среда для их роста. В них содержится обилие реактивного железа и органических веществ – источника энергии для сульфатредуцирующих бактерий, источника сферических гранул для фрамбоидальных псевдоморфоз; стабилизатора геля и ископаемых отпечатков, в которых фрамбоиды защищены от внешнего воздействия. Фрамбоиды часто находят внутри таких ограниченных пространств, как раковинки фораминифер, диатомовые фрустулы, трубки полихет и клетки растений.

В лабораторных условиях была выявлена общая зависимость формы и размеров фрамбоидов от температуры: с ростом температуры увеличиваются размеры и округлость агрегатов, агрегаты же, образованные при более низких температурах имеют меньший размер (Sunagawa et al., 1971). Эти выводы основаны на изучении процесса образования фрамбоидального пирита при температурах от 200 до 300°C и давлении от 15 до 85 атм, т.е. в условиях, существенно отличающихся от тех, в которых, как принято считать, фрамбоидальный пирит образуется в естественных условиях.

При высокотемпературном синтезе пирита (от 250 до 500°C) было также выявлено, что при росте температур и (или) степени перенасыщения изменяется форма кристаллизации пирита в такой последовательности: куб – октаэдр – пиритоэдр (пентагон-додекаэдр) (Murowchick, Barnes, 1987). Подобная последовательность форм кристаллов пирита частично или полностью наблюдается и при переходе от “неплодородной” породы к минерализованному гидротермальным жилам (Sunagawa, 1957 in Murowchick, 1987). Это наблюдение согласуется с тем, что с возрастанием степени перенасыщенности облик кристаллов меняется от кубической формы через октаэдры к пиритоэдрам (Murowchick, 1987).

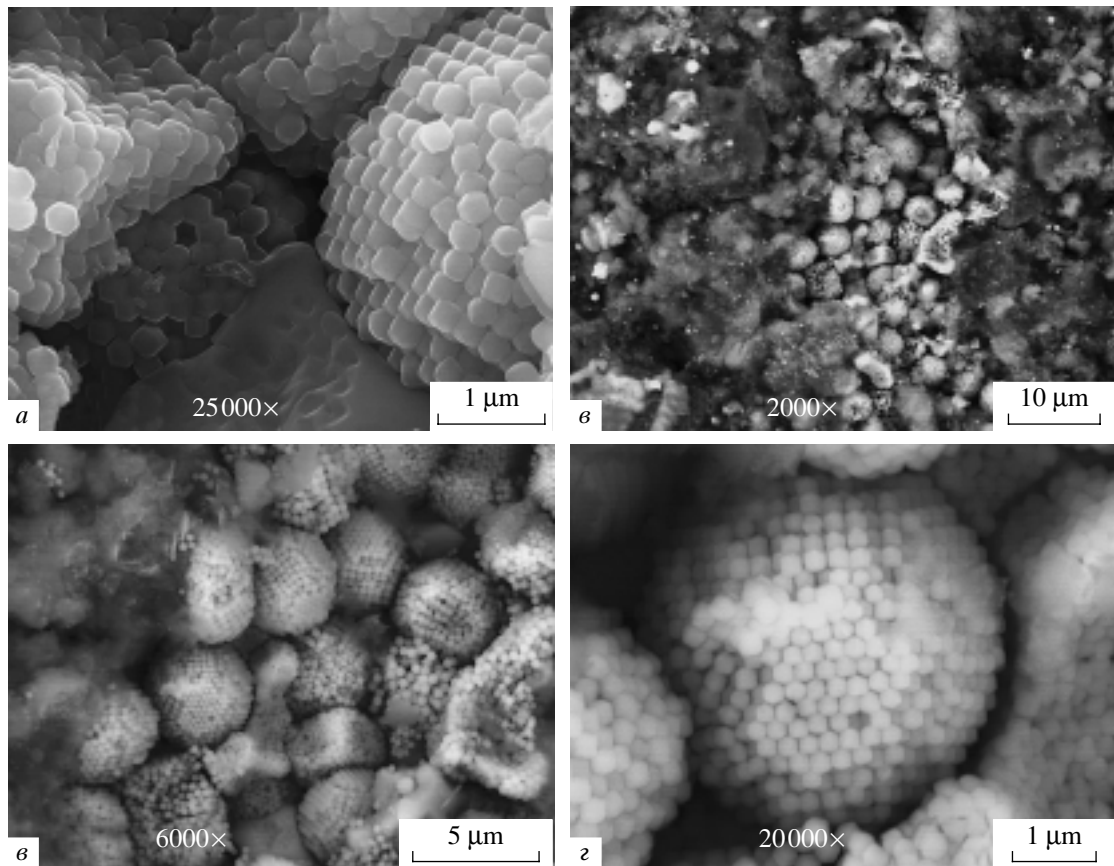


Рис. 2. Фрамбоиды из метеорита Тэгиш-Лейк; экземпляры хранятся в Лаборатории космических наук Центра космических полетов Дж. Маршалла в Хантсвилле, штат Алабама, США.

По данным других авторов (Graham, Ohmoto, 1994), кубические кристаллы пирита тоже образуются при наиболее низких температурах. Однако образование октаэдров и пиритоздров, по их данным, несколько отлично. Рост кристаллов пирита в этом эксперименте (150–350°C) происходил на поверхностях пирротина (Fe_{1-x}S) и на частицах серы, причем на пирротине при повышении температуры начинали расти кубо-октаэдрические и октаэдрические кристаллы, а на частицах серы – пиритоздры (пентагон-додекаэдры). При более низких температурах и на том, и на другом субстрате выростали кубические кристаллы. Таким образом, был сделан вывод о зависимости образования кристаллов пирита от типа поверхности осаждения и от химической характеристики окружающей среды.

Однако, как уже говорилось, образование фрамбоидальных структур в естественных условиях происходит как в осадке на стадии раннего диагенеза, так и в водной массе бассейнов. Совершенно очевидно, что для подобных условий характерны температуры существенно ниже 100°C, а точнее – температуры образования фрамбоидального пирита в естественных условиях приближаются (или со-

ответствуют) температуре воды в придонной части бассейна. Но при низкотемпературном (25°C) синтезе пирита фрамбоиды вообще не были получены (Luther, 1991). Это позволило экспериментатору сделать вывод о том, что в естественных условиях осадконакопления в процесс образования фрамбоидов вовлекаются другие механизмы, нежели в лабораторных условиях.

Образование же фрамбоидальных структур пирита с кристаллами в форме октаэдров и пиритоздров, а также икосаэдров, в природных условиях при температурах намного меньше 100°C требует дополнительного объяснения. По всей видимости, биологический фактор как раз и играет роль “катализатора” при образовании фрамбоидальных структур. Именно он и контролирует форму образующихся кристаллитов, слагающих фрамбоиды. Эта мысль хорошо согласуется с идеей Н.П. Юшкина (устное сообщение) о кристаллографической специфике биогенно образованных разновидностей минералов.

Таким образом, можно предположить, что образование кубических кристаллов фрамбоидов, не встреченных нами, может быть связано преимущественно с химическим осаждением пирита.

Формирование же пентагон-додекаэдров (пиритозэдров), вероятно, обусловлено действием биологического фактора, т.е. биогенностью их происхождения. Биогенное происхождение, по всей видимости, имеют и фрамбониды икосаэдрической формы, которые в условиях эксперимента ни разу не были получены.

Итак, мы предполагаем преимущественно биогенное происхождение фрамбонидальной пирита пентагон-додекаэдрической и икосаэдрической формы, причем кристаллиты в форме октаэдров и тетраэдров могут рассматриваться как составные части икосаэдров. Объединяет же икосаэдры и пентагон додекаэдры наличие осей симметрии 5-го порядка.

Однако в естественных условиях, скорее всего, нельзя рассматривать действие биогенного фактора изолированно от других факторов окружающей среды. По нашему мнению, как уже было указано выше, при кристаллизации фрамбонидальных структур преобладающую роль играет биологический фактор и лишь в образовании фрамбонидов с кубическими кристаллитами можно допустить доминирование чисто химических процессов. Надо сказать, что обычно форма кристаллитов постоянна для каждого фрамбонидов (Butler, Rickard, 2000).

Внешне фрамбониды земных пород практически неотличимы от многочисленных фрамбонидов, обнаруженных в метеоритах – карбонатных хондритах, особенно таких, как Тэгиш-Лейк (рис. 2). Поэтому проведенные исследования крайне важны и для изучения фрамбонидальных структур внеземного происхождения.

Авторы благодарны за ценные советы при обсуждении материала академику Н.П. Юшкину, Л.М. Герасименко, В.К. Орлеанскому и Г.Т. Ушатинской, а А.В. Кравцеву и Л.Т. Протасевичу за помощь при работе на сканирующем микроскопе CamScan-4.

Работа выполнена по программе Президиума РАН “Возникновение и эволюция биосферы”, подпрограмма II (“Возникновение жизни и эволюция геобиологических систем”). Она поддержана грантами РФФИ 02-04-48094 и НШ-974.2003.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астафьева М.М. Фрамбонидальные структуры черных сланцев кембрия Сибирской платформы и перми шельфа Баренцева моря // Палеонтол. журн. 2005. № 1. С. 3–8.
- Богуш И.А., Бурцев А.А. Онтогенез фрамбонидального пирита // Биосферные взаимодействия: Жизнь и камень. Матер. 1-го Междунар. симпоз. СПб, 2002. С. 49–51.
- Герасименко Л.М., Заварзин Г.А. Реликтовые цианобактериальные сообщества // Проблемы доантропогенной эволюции биосферы. М.: Наука, 1993. С. 222–253.
- Гусев М.В., Минеева Л.А. Микробиология. М.: Изд-во МГУ, 1992. 448 с.
- Заварзин Г.А., Колотилова Н.Н. Введение в природо-доведческую микробиологию. М.: Кн. дом Ун-т, 2001. 256 с.
- Кизильштейн Л.Я. Роль сульфидов железа в добиогенном синтезе и концентрировании органических соединений // Докл. РАН. 1998. Т. 359. № 3. С. 383–385.
- Кизильштейн Л.Я., Минаева Л.Г. Происхождение фрамбонидальных форм пирита // Докл. АН СССР. 1972. Т. 206. № 5. С. 1187–1189.
- Федорова Т.А., Герасименко Л.М., Бочко Р.А., Заварзин Г.А. Микроминеральные выделения в термофильных цианобактериальных сообществах // Вулканол. и сейсмол. 1988. № 1. С. 101–104.
- Berner R.A. The synthesis of framboidal pyrite // *Econom. Geol.* 1969. V. 64. P. 383–384.
- Berner R.A., Baldwin T., Holdren G.R. Authigenic iron sulfides as paleosalinity indicators // *J. Sediment. Petrol.* 1979. V. 49. № 4. P. 1345–1350.
- Berner R.A. Sedimentary pyrite formation: an update // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1984. V. 48. P. 605–615.
- Berner R.A., Westrich J.T. Bioturbation and the early diagenesis of carbon and sulfur // *Amer. J. Sci.* 1985. V. 285. P. 193–206.
- Butler I.B., Rickard D. Framboidal pyrite formation via the oxidation of iron (II) monosulfide by hydrogen sulfide // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2000. V. 64. P. 2665–2672.
- Farrand M. Framboidal sulfides precipitated synthetically // *Miner. Deposita.* 1970. V. 5. P. 237–247.
- Graham U.M., Ohmoto H. Experimental study of formation mechanisms of hydrothermal pyrite // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1994. V. 58. P. 2187–2202.
- Jorgensen B.B. Bacterial sulfate reduction within reduced microniches of oxidized marine sediments // *Mar. Biol.* 1977. V. 41. P. 7–17.
- 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. № 11–12. Pt 2. P. 1454–1468.
- Kribek B. The origin of framboidal pyrite as a surface effect of sulfur grains // *Miner. Deposita.* 1975. V. 10. P. 389–396.
- Luther III G.W. Pyrite synthesis via polysulfide compounds // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1991. V. 55. P. 2839–2849.
- Morrissey C.J. A quasi-framboidal form of syn-sedimentary pyrite // *Trans. Inst. Mining Metallurgy. Sect. B.* 1972. V. 81. P. B55–B56
- Murowchic J.B., Barnes H.L. Effects of temperature and degree of supersaturation on pyrite morphology // *Amer. Mineralogist.* 1987. V. 72. P. 1241–1250.
- Ohfuji K., Akai J. Icosahedral domain structure of framboidal pyrite // *American Mineralogist.* 2002. V. 87. P. 176–180.
- Raiswell R., Whaler K., Dean S. et al. A simple three-dimensional model of diffusion-with-precipitation applied to localised pyrite formation in framboids, fossils and detrital iron minerals // *Mar. Biol.* 1993. V. 113. P. 89–100.
- Sawlowicz Z. Pyrite framboids and their development: a new conceptual mechanism // *Geol. Rundsch.* 1993. Bd 82. S. 148–156.

Skei J.M. Formation of framboidal iron sulfide in the water of a permanently anoxic fjord – Framvaren, South Norway // *Mar. Chemistry*. 1988. V. 23. P. 345–352.

Sunagawa I., Endo Y., Nakai N. Hydrothermal synthesis of framboidal pyrite // *Soc. Mining Geol. Japan*. 1971. V. 2. Spec. Issue. P. 10–14.

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. A reply to Dr. S. I. Kalogeropoulos and a further contribution // *Miner. Deposita*. 1983. V. 18. P. 129–130.

Wilkin R.T., Barnes H.L. Formation processes of framboidal pyrite // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1997a. V. 61. № 2. P. 323–339.

Wilkin R.T., Barnes H.L. Pyrite formation in an anoxic estuarine basin // *Amer. J. Sci.* 1997b. V. 297. P. 620–650.

Объяснение к таблице I

Фиг. 1, 2. Фрамбоиды из черных сланцев огоньорской свиты (пограничные слои среднего и верхнего кембрия) Сибирской платформы: 1 – экз. ПИН, № 5080/1а, 2 – экз. ПИН, № 5080/1б.

Фиг. 3, 4. Фрамбоиды из черных сланцев куонамской свиты (нижний кембрий) Сибирской платформы: 3 – экз. ПИН, № 5080/2; 4 – экз. ПИН, № 5080/3а.

Фиг. 5, 6. Фрамбоиды из черных сланцев синской свиты (нижний кембрий) Сибирской платформы: 5 – экз. ПИН, № 5080/4а; 6 – экз. ПИН, № 5080/5.

Объяснение к таблице II

Фиг. 1–6. Фрамбоиды из черных сланцев верхней перми шельфа Баренцева моря (скважина Северо-Кильдинская-82); экземпляры хранятся в Лаборатории космических наук Центра космических полетов Дж. Маршалла в Хантсвилле, штат Алабама, США.

Framoids: their structure and origin

M. M. Astafieva, A. Yu. Rozanov, R. Hoover

Framboidal structures are usual both in Earth rocks and in meteorites – carbonate chondrites. In the paper the main ways of these structures are discussed. The role of biogenic factor in framboidal formation is appreciated. The comparison of crystallites, from which framboids are consisted in nature and received in laboratory conditions, was led. On the basis of investigation of framboidal structures the proposition about typicalness of framboidal form of crystals for formation of biogenic framboidal structures was made.