

БИОМИНЕРАЛЫ ЛАТЕРИТНЫХ БОКСИТОВ – НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ

А.Д. Слукин, Н.М. Боева
Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ), РАН, Москва,
boeva@igem.ru

Е.А. Жегалло, Л.В. Зайцева
Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка (ПИИ), РАН, Москва, ezheg@paleo.ru

Систематическое исследование латеритных бокситов с помощью электронных микроскопов обнаружило обильные продукты взаимодействия органического вещества (биоты) и минералов. Получены новые данные о минерализации в тропических условиях водорослевых отложений, древесины, корневой системы растительности, биопленок и бактерий и последовательном их превращении в биоморфозы, совершенные кристаллы гётита, гематита, гиббсита, кальцита и причудливые формы псиломелана. Уникальные фотографии демонстрируют перемолотые продукты пищеварительного тракта роющих и ползающих организмов и образовавшиеся из них одиночные призматические кристаллы гиббсита, а затем их массовое развитие. Установлено, что в ходах и норах червей в бокситах кристаллизуется мономинеральный гиббсит. В свободных пространствах крупных пор и каверн на поверхности биопленок подобные продукты превращаются в смесь гиббсита, гематита, кальцита, местами, галлуазита и псиломелана. Несомненно, на состав минеральных ассоциаций влияют микрокальные обстановки и поступление кальция, кремния и других химических элементов с капиллярными водами во время сухих сезонов. Продукты биоминерализации имеют микроскопические размеры, но они имеют универсальное и глобальное значение для всех кор выветривания (особенно тропических) и ассоциирующихся с ними осадочных месторождений бокситов, железных и марганцевых руд, каолинов и бентонитов.

В статье 7 рисунков, список литературы из 31 названия.

Ключевые слова: биоминералы, биопленки, биоморфозы, роющие организмы, боксит, гиббсит, гематит, псиломелан, кальцит.

Латеритные бокситы — продукты высшей степени выветривания алюмосиликатных пород в условиях жаркого тропического климата с чередующимися дождливыми и сухими сезонами. Бокситы являются главными и наиболее экономически выгодными рудами алюминия, лучшие сорта которых сложены почти мономинеральным гиббситом $Al(OH)_3$ или биминеральной смесью гиббсита и бёмита $AlO(OH)$. Обычно они содержат переменные количества минералов железа, титана и, в зависимости от субстрата, примеси некоторых других элементов-гидролизатов в различных формах. Геохимия процессов выветривания и бокситообразования выражается в растворении дождевыми водами материнских пород, в синхронном выносе щелочных и щелочноземельных элементов и кремния и фиксации *in situ* Al, Fe, Ti, Mn, которые образуют малорастворимые в зоне латеритизации продукты гидролиза и окисления. Эти изменения протекают в поверхностной зоне литосферы, и их продукты легкодоступны для наблюдения и изучения. Вместе с тем, латеритные коры выветривания являются самыми емкими природными концентраторами коллоидных и метаколлоидных частиц, нано- и микроразмерных минералов, суммарное ко-

личество которых нередко превышает 60% объема породы. Поэтому до недавних пор исследователи сталкивались со множеством трудностей из-за недостатка разрешающей способности глаза и имевшихся оптических приборов. Только во второй половине XX века с использованием электронных микроскопов появилась возможность увидеть мир нано- и микроразмерных частиц и минералов, слагающих почвы, коры выветривания, бокситы и другие металлические и неметаллические полезные ископаемые. Непреходящий интерес представляют продукты взаимодействия живой природы, мортмассы (биоты) и косной материи горных пород. Результаты изучения этих продуктов под электронным микроскопом позволили установить формы их зарождения и эволюции.

Бокситоносные латеритные профили занимают выположенные вершины холмов и невысоких гор, характерными представителями которых являются останцы трапловых плато Сибирской, Индостанской, Африканской и других платформ. Вершины останцов обычно плоские, горизонтальные, реже — выпуклые, ступенчатые и вогнутые. В сезон муссонных дождей вся толща выветривающихся пород (мощностью до 150 м, например,

в Восточных Гатах в Индии) насыщается водой, а вогнутые, блюдцеобразные вершины превращаются во временные водоемы. В этих условиях доступ кислорода прекращается, и создается восстановительная обстановка, в которой Fe^{3+} переходит в Fe^{2+} , растворяется и выносится, что приводит к почти полному обелению горизонтов бокситов и подстилающих их каолинов (Слукин, 1983). В сухой сезон вода, насыщающая кору выветривания, частично высачивается по склонам останцов, двухвалентное железо мгновенно окисляется и выделяется в виде натечных форм гематита. Другая часть этой воды, благодаря капиллярному подъему и эвапотранспирации, достигает вершины останца, где при совокупном воздействии окислительного и испарительного барьеров формируется покровный латеритный горизонт, содержащий до 60–80% Fe_2O_3 в виде гематита и гётита, смешанных с гиббситом и каолинитом.

Поверхность латеритов обычно покрыта разнообразной макрофлорой: деревьями, кустарниками, травами. Кроме того, по нашим наблюдениям, на этой поверхности развита плотная, непроницаемая для глаз, фетроподобная пленка из тесно переплетенных гифов грибов и корней микрофлоры. Ниже дневной поверхности на выветривающиеся горные породы интенсивно воздействует корневая система макрофлоры, местами проникающая на глубину более 10 м (Слукин и др., 2014). Меньшей глубины достигает роющая фауна: термиты — до 5 м, дождевые черви — до 1.5 м (Ивашов, 1993). Верхние 100 см латеритного профиля изобилуют следами воздействия биоты, и выделяются исследователями в особую зону гомогенизации, или биологической педотурбации (Theng, 2008; Слукин и др., 2014). Эта зона испещрена ходами роющих организмов, пронизана минерализованными корнями флоры, биоминеральными пленками, в различной степени раскристаллизованными, насыщена многочисленными разнообразными фито- и биоморфозами. На вогнутых поверхностях столовых гор и в эрозионных депрессиях, заполненных временными водоемами, развиты биоморфозы по диатомовым водорослям. Особенно поражает обилие в этой зоне биоминеральных пленок. При изучении бокситов мы впервые обнаружили на поверхности полевых шпатов цианобактериальные маты, превращающиеся в стопки полисинтетических двойников гиббсита (Слукин и др., 1986). Сейчас установлено, что биопленки распространены повсеместно, на поверхностях всех минералов, где имеется любая степень смачиваемости.

Основная масса биопленок состоит из полисахаридов, продуцируемых клетками от микронной размерности до первых сотен нанометров (Розанов, 2007). Особенностью публикуемой статьи является попытка показать роль макро- и микроорганизмов, продуктов их жизнедеятельности и мортмассы в процессах тропического выветривания горных пород.

Объекты, материалы и методы

Объектами изучения явились латеритные бокситы крупнейших месторождений Индии, Гвинеи, Бразилии и России. Материалами для исследования служили образцы бокситов, собранные авторами, академиком Ф.В. Чухровым, а также бывшими аспирантами А.Д. Слукина: А.К. Наңди (Slukin *et al.*, 1989), У.Б. Камара (Громов и др., 1991) и Ансуманом Силла. Образцы пород и чистых минералов этих объектов были изучены с помощью усовершенствованных методов термического анализа и электронной микроскопии (Боева и др., 2012_{1,2}; Boeva *et al.*, 2013; 2014). Были использованы просвечивающий электронный микроскоп JEM-2100 («JEOL», Япония) при ускоряющем напряжении 200 кВ с приставкой для рентгеновского энергодисперсионного анализа X-Max («Oxford Instruments», Великобритания), сканирующие электронные микроскопы JSM-5610LV («JEOL Ltd», Япония) с ЭДС INCA-450, CamScan-4 («Cambridge») и TESCAN VEGA IIXMU («Tescan»).

Минералы бокситов

Изучение латеритных бокситов под электронным микроскопом обнаруживает поразительный микромир, в котором сочетаются разнообразные аморфные, скрытокристаллические и яснокристаллические вещества. Особый интерес вызывают обильные пленки. В поле зрения наших исследований были вовлечены продукты латеритизации органического происхождения: строматолиты, водоросли (рис. 1а), древесина (рис. 1б), корни растений (рис. 1с), гифы грибов, а также продукты пищеварительного тракта роющих организмов, перекристаллизованные в гиббсит с редкими кристалликами гётита (рис. 1д). Все они сопровождалась биопленками и множеством биоморфоз по разнообразным бактериям. Было установлено, что и среди продуктов выветривания горных пород неорганического происхождения подобные пленки широко развиты. Известно, что биопленки

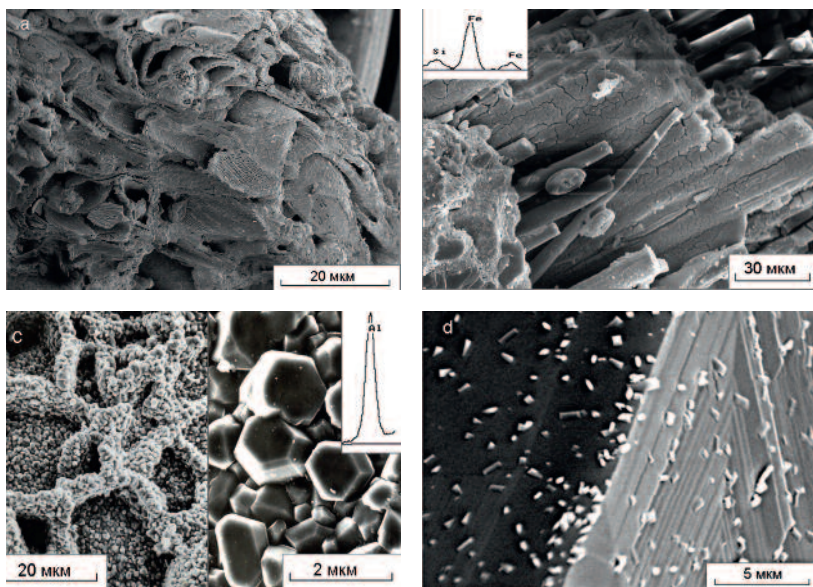


Рис. 1. Биоморфозы и кристаллы гётита и гибbsite в латеритах: а – водорослевый горизонт, полностью замещенный гётитом (р. Мая, Сибирь); б – древесина и бактерии, замещенные скрытокристаллическим гётитом, и его состав (р. Татарка, Енисейский край); в – корневая система, замещенная гибbsite с примесью рутила и их состав (Гвинея); д – поверхность кристалла гибbsite с редкими кристалликами гётита (Чагобецкое подгитие, Сибирь). СЭМ.

стали предметом научного изучения еще в конце XIX в., однако систематические исследования начались в 80-х годах XX в. (Розанов, 2007). При этом в ископаемом состоянии биопленки не описывались. Поэтому вероятно, что наши публикации о широком развитии биопленок в латеритных бокситах были одними из первых (Слукин и др., 1986; 2013; Школьник и др., 2004; Ископаемые бактерии..., 2011).

Биопленки по своей морфологии, структуре, минеральному и химическому составу разнообразны и в зависимости от субстрата характеризуются резкой изменчивостью даже в пределах узких интервалов нано- и микроразмерной шкалы. Они являются сложным продуктом взаимодействия органического вещества и выветривающихся минералов. Биопленки представляют собой совокупность микробных клеток, других мельчайших частиц, воды и внеклеточного полимерного органического вещества, которое удерживает клетки вместе и на поверхности (Бактериальная палеонтология, 2002). Полимерное органическое вещество также имеет микробное происхождение и состоит из бактериальных клеток и их обломков, среди которых могут находиться частично разложившиеся цианобактерии, или сине-зеленые водоросли, микроколонии различных организмов, глинистые и иные минералы. Оно представляет собой открытую пористую структуру с пустыми полостями, заполненными водой. Поры размером более микрона могут служить путями проникновения в них микроор-

ганизмов. Физические, химические и биологические свойства биопленок зависят от окружающей среды, в которой они находятся. Важнейшим фактором взаимодействия являются сами микроорганизмы, их присутствие и активность, взаимное влияние популяций, образующих сообщество. К биопленкам, только структурированным, относят и циано-бактериальные маты. Еще одной особенностью живой органической материи и морт-массы является выделение слизи (гликокаликса). Добавим, что бокситы являются продуктами суммарного воздействия микро- и макроорганизмов, и в них также ярко проявилась роль роющих организмов, которые для своего движения выделяют особенно много слизи (Слукин и др., 2014; 2015).

Результаты проведенных наблюдений показали, что в латеритных бокситах биопленки, гликокаликс, бактериальные маты находятся на разных стадиях развития и минерализации: от едва намечающихся рассеянных микрокристаллов до сплошных друз и щеток совершенных кристаллов. На рисунке 2а показано изображение простейшей биопленки с трещинами усыхания и дискообразной биоморфозой по *Synechococcus*. Биопленки имеют красный цвет и одинаковый химический состав, соответствующий гематиту. На рисунке 2б видна почти полностью раскристаллизованная биопленка, покрытая кристаллами гибbsite и биоморфозами гематита. На рисунке 2с приведены биоморфозы гематита по шарообразным коккоидным бактериям. Они представляют собой фигуры срастания

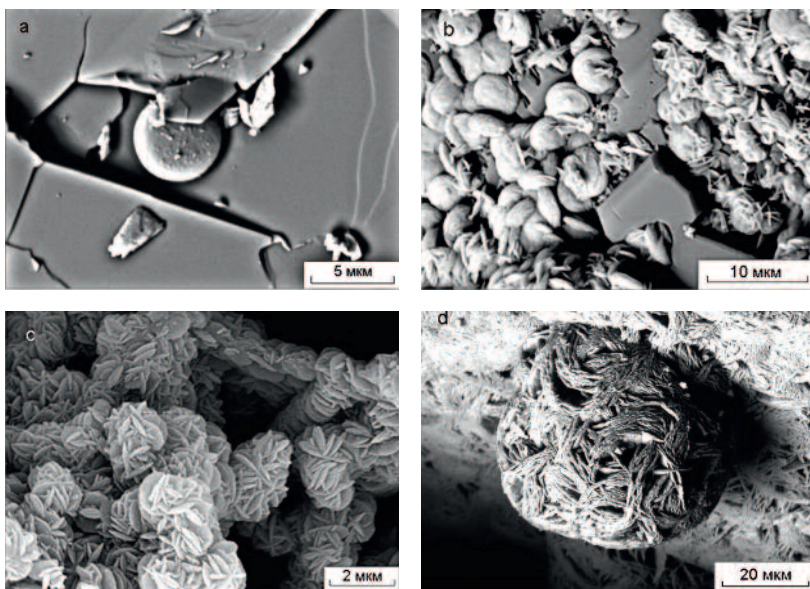


Рис. 2. Биоморфозы гематита:
 а — биопленка и минерализованная бактерия (месторождение Гудем, Вост. Гаты, Индия);
 б — полностью раскристаллизованная биопленка с биоморфозами гематита и кристаллами гиббсита (там же, Индия);
 с — биоморфоза гематита по скоплениям кокков (Гвинея);
 д — раскристаллизованная биопленка и биоморфоза гематита в виде агрегатов «железной слюдки» (Гудем, Индия). СЭМ.

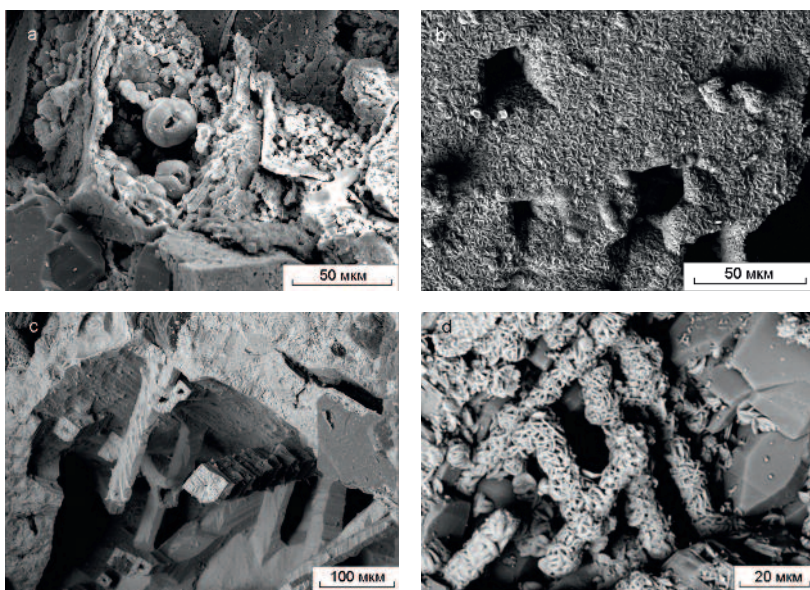


Рис. 3. Гематит в бокситах (месторождение Гудем, Вост. Гаты, Индия):
 а — округлые биоморфозы гематита по бактериям среди кристаллов гиббсита;
 б — бактериальный мат, полностью замещенный гематитом;
 с — скелетный каркас псевдоморфозы гематита по пироксену без видимого участия организмов;
 д — такой же каркас, покрытый биоморфозами гематита по бактериям. СЭМ.

тонкопластинчатых округлых кристаллов гематита. Среди них есть правильные фигуры, имеющие в плане вид шестилучевой звезды и неправильных многолучевых звезд, а также сложные нарастания множества пластинок на один пинакоид. Широко развиты решетчатые структуры раскристаллизованного гликокаликса, в котором все пластинки гематита ориентированы перпендикулярно поверхности биопленки, а на ней располагаются причудливые биоморфозы гематита, напоминающие по виду мотки пряжи, представляющие собой агрегаты «железной слюдки» (рис. 2д),

скрученные канаты и другие формы таких биоморфоз (рис. 3). Так, среди кристаллов гиббсита внутри ящичной псевдоморфозы гематита по гранату находятся биоморфозы гематита в виде кренделя (рис. 3а). При дополнительном пятикратном увеличении этого снимка становится заметно, что бактерии имели скрученную палочковидную форму. Бактериальный мат, в химическом составе которого были установлены железо и кислород, местами также ничтожные примеси алюминия и кремния, превратился в сплошной покров табличчатых кристаллов гематита

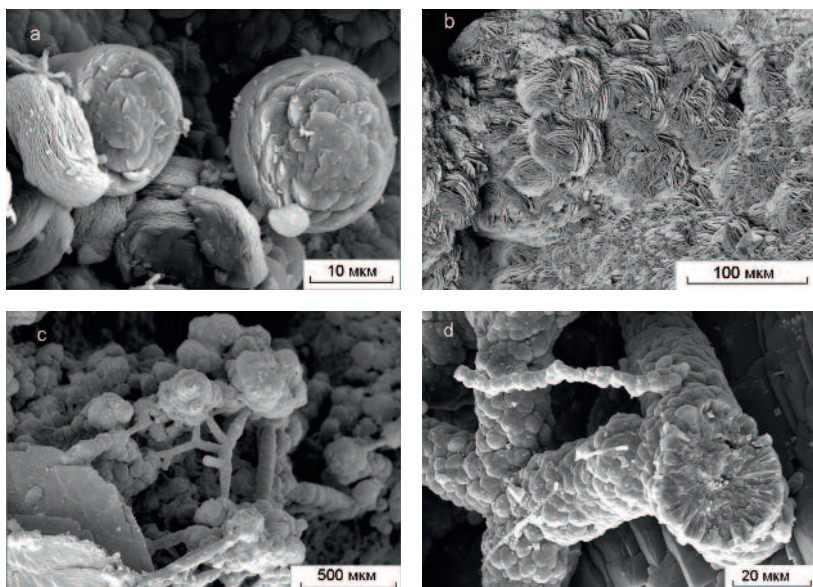


Рис. 4. Формы яснокристаллического гематита в бокситах: а и б — бактерии, превратившиеся в «железные розы» (Гудем, Вост. Гаты, Индия); с и d — гифы грибов, замещенные гематитом (Ибджибек, Чагобецкое погнятие, Сибирь). СЭМ.

(рис. 3b). Очевидно, что условия выветривания и насыщенность бактериями даже для двух соседних кристаллов гематита могут значительно отличаться друг от друга. Например, на рисунке 3с скелетный каркас псевдоморфозы гематита по пироксену не несет вещественных следов бактериального присутствия. Сростки призматических элементов каркаса имеют четкие кристаллографически структурированные поверхности. На поперечных срезах призм проявлено радиально-лучистое расположение пластинок гематита. Соседние кристаллы пироксена, также превратившиеся в скелетные псевдоморфозы гематита, были заселены колониями коккоидных бактерий и образовали биоморфозы гематита (рис. 3d).

На начальной стадии биоминерализации пленки и микробы имеют гладкие поверхности без видимых под СЭМ каких-либо признаков структуризации вещества. Тем эффективнее отличаются от них продукты последних стадий биоминерализации (рис. 4). На рисунке 4а слева на торце биоморфозы видно, как она разделяется на субпараллельные тонкие (доли микрона) пластинки гематита. На фронтальной поверхности биоморфозы наблюдаются пинакоиды гематита, частично налегающие друг на друга и образующие так называемые «железные розы». При раскристаллизации пленок развиваются сплошные покровы подобных «роз» (рис. 4b). При минерализации гликокаликса и гифов грибов возникают более сложные композиции, похожие на цветы со стеблями (рис. 4с, d).

Особенно интересные результаты изучения минералов гиббситовых бокситов под электронным микроскопом были получены при исследовании продуктов жизнедеятельности роющих организмов. Последние оставили после себя норы, ходы, минерализованные продукты пищеварительного тракта в ходах и на поверхности биопленок. Норы создаются для защиты от врагов с помощью секрета специальных желез, расположенных на брюшной стороне передней части тела (Геккер, Ушаков, 1962). Таким образом, возникают трубки, превосходящие своей твердостью и прочностью вмещающую их породу: при разломе образцов бокситов трубки, как правило, сохраняют свою цилиндрическую форму (рис. 5а). Диаметр трубки на рисунке около 150 мкм, видимая длина более 300 мкм, но в зависимости от размера организма эти параметры меняются в широких пределах. Отметим, что среди перемолотых роющими организмами гиббситовых бокситов трубки заполнены также гиббситом, но в виде целых тонкопластинчатых кристаллов радиально-лучистого сложения.

В зоне биологической педотурбации ходы роющих организмов густо испещряют бокситы (Слукин и др., 2014). В поперечных сечениях ходы выглядят как округлые отверстия. Под электронным микроскопом были изучены ходы диаметром 50—500 мкм и длиной до 5 см. Известно, что представители мезофауны: дождевые черви, муравьи, термиты и другие, проделывают ходы и большего размера. Наши наблюдения позволяют судить о меха-

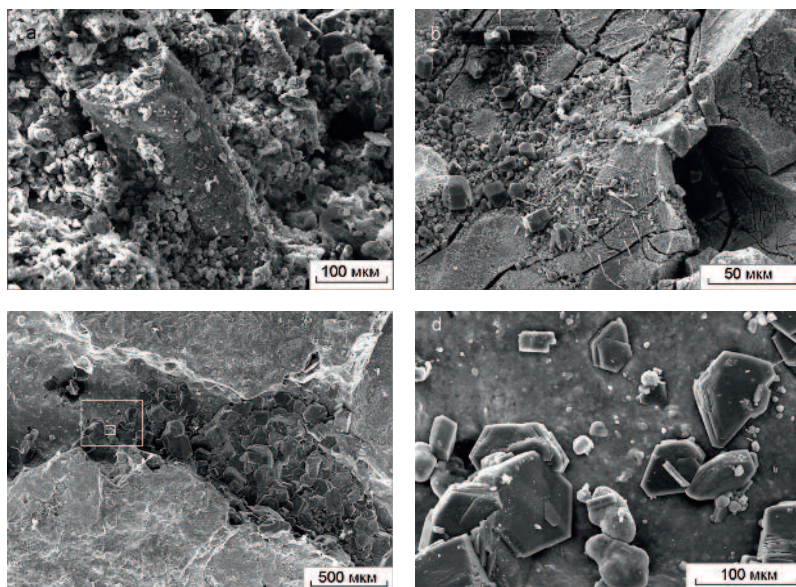


Рис. 5. Следы роющих организмов в бокситах (Индия): а — трубка, заполненная радиально-лучистыми пластинчатыми кристаллами гиббсита (месторождение Белгаум, штат Махараштра); б — поперечный срез хода червя и частично раскристаллизованная слизь — биопленка с трещинами усыхания, покрытая рассеянными кристаллами гиббсита (Гудем, Вост. Гаты); в — продольное сечение хода червя, заполненного комочками боксита, прошедшими через пищеварительный тракт и подвергшимися перекристаллизации; рамки ограничивают участки укрупненных деталей на следующих рисунках (месторождение Лохарга, штат Бихар); д — деталь в пределах большей рамки: таблеччатые кристаллы гиббсита на поверхности биопленки; СЭМ.

низме проходки, который включает смачивание и сверление. При этом имеет место смачивание, по крайней мере, двух видов. Первый — выделение обильной слизи перед собой для покрытия и обработки локальной площадки, размер которой в несколько раз превышает диаметр намечаемой для проходки скважины — хода. Эта слизь сохранилась вокруг множества ходов, превратившись в биопленку, частично или полностью минерализованные (рис. 5b–d). Второй — выделение слизи кожными железами (например, у *Polydora*, *Dodacaceria* и др.) для смазки и сверления ходов. Создание ходов в бокситах с помощью сверления подтверждается наличием выдержанного концентрического слоя шлама, состоящего из перемолотых минеральных зерен локального субстрата. Вероятно, наибольшая роль среди роющих организмов принадлежит многощетинковым кольчатым червям (*Annelida*, *Polychaeta*), которые преобладают в тропическом поясе Земли. На рисунке 5b хорошо видно поперечное сечение хода и биопленки вокруг и внутри него. Они разбиты трещинами усыхания и рассеянными разноразмерными кристаллами гиббсита. На рисунке 5c показано продольное сечение хода червя. Здесь присутствуют комочки боксита, прошедшего через пищеварительный тракт, и биопленка, покрытая редкими кристаллами гиббсита. Сравнивая между собой содержимое множества просмотренных ходов, подобные мы назвали ходами с незавершенной кристаллизацией. При большей детализации на рисунке 5d видно, что наряду с ос-

вершенными короткопризматическими гексагональными кристаллами гиббсита сосуществуют кокки и биопленки. На рисунке 6 (a,b) изображены также длиннопризматические полисинтетические двойники кристаллов гиббсита, образующие сложные сростки. Во многих ходах продукты переработки пищеварительного тракта были полностью перекристаллизованы и превратились в скопления близких по размеру призматических кристаллов гиббсита (рис. 6c). Такие ходы мы отнесли к ходам с завершённой кристаллизацией. На гранях призмы некоторых кристаллов видны следы коррозии и растворения между пинакоидами двойников. Очевидно, это может быть связано с ежегодной сменой сухих сезонов, когда воздействуют наиболее кислые биохимические растворы, и дождливых сезонов, когда латериты до самой поверхности заполняются дождевыми водами со значениями pH, близкими к нейтральным. В таких изменяющихся условиях на многих кристаллах фиксируются следы роста и растворения гиббсита.

В бокситах местами встречаются минералы оксидов и гидроксидов марганца. Они находятся в виде желваков и оолитов псиломелана в латеритизированных долеритах, слагающих сибирские траппы, например в бокситопоявлении Дабаан на севере Якутии. Очень сложное геологическое строение имеют мел-палеогеновые месторождения Центральное и Чукгукон на куполах Чадобецкого поднятия (междуречье Ангары и Подкаменной Тунгуски). Исходные материнские поро-

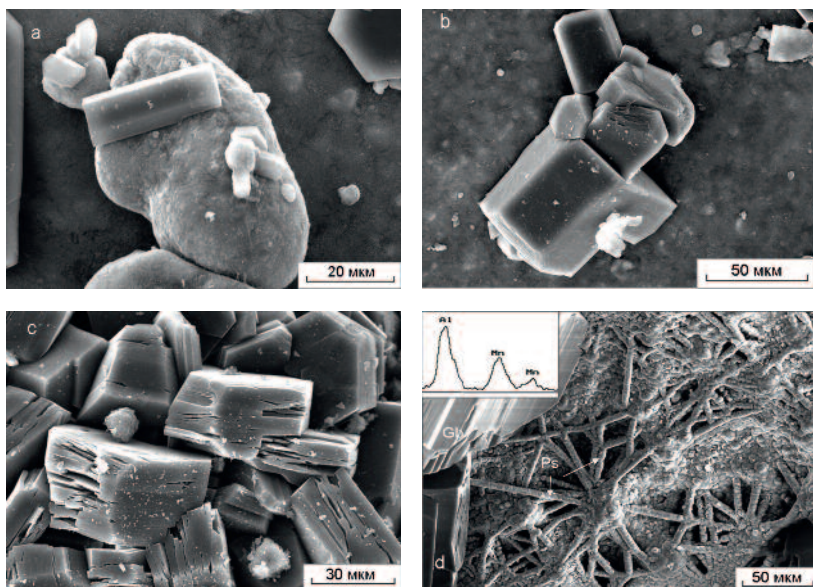


Рис. 6. Кристаллы гипбсита в ходах червей: а – длиннопризматический кристалл гипбсита на биоморфозе гематита (гематит в пределах меньшей рамки на рисунке 5с; b – сложные сростки кристаллов гипбсита на поверхности биопленки (Лохаргага, штат Бихар); с – полностью раскристаллизованные продукты пищеварительного тракта организма, превратившиеся в гипбсит с заметными следами частичного растворения кристаллов (месторождение Катни, п-ов Кач, штат Гуджарат, Индия); d – паукообразные биоморфозы псиломелана (Ps) и их состав среди кристаллов гипбсита (Gb) (месторождение Посус-гу-Калдас, Бразилия). СЭМ.

ды: синийские кварц-мусковит-полевошпатовые сланцы и алевролиты вмещают комплекс щелочных ультраосновных пород, включая дайки, силлы, кимберлитовые трубки взрыва и карбонатитовые тела. На них сформировалась латеритная кора выветривания мощностью 300 – 600 м. При этом на алюмосиликатных породах образовались гипбситовые бокситы, а на карбонатитах – железомарганцевые охры, сложенные гётитом, гематитом, псиломеланом, пиролюзитом, манганитом, голландитом, литиофоритом, рамделлитом и обильными рентгеноаморфными веществами, похожими на гематит и псиломелан, но с большим количеством воды. Первичные пирокслоры $(\text{Na,Ca})_2(\text{Nb,Ti})_2\text{O}_6$ $[\text{F,OH}]$ карбонатитов при латеритизации полностью теряют натрий и кальций и замещаются вторичными, гипергенными Се-, Y-, Ва-, Sr-содержащими пирокслорами. В охрах неравномерно распределены гнезда и слои гипергенных фосфатов редких земель: монацита $(\text{Ce, La})\text{PO}_4$, рабдофана $(\text{Ce,Lu})\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, флоренсита $\text{CeAl}_3[\text{PO}_4]_2[\text{OH}]_6$ и чёрчита $\text{YPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Марганцевые минералы, особенно их скрытокристаллические разновидности и рентгеноаморфные вещества, содержат повышенные количества редких земель. При денудации продукты латеритизации всех вышеперечисленных пород смешивались, образуя в эрозионных депрессиях бокситы с аномально высокими концентрациями редких и редкоземельных элементов (Слукин, 2005; Slukin, 1994; Slukin *et al.*, 1989). Заметными концентрациями марганца выделяются бок-

ситы района Посус ди Калдас (Pocos de Caldas), Бразилия. Этот элемент там входит в состав литиофорита; слагающего конкреции (Bardossy, Aleva, 1990). В рамках нашего исследования представляют особый интерес биоморфозы марганцевых минералов. Нами обнаружены обильные черные биопленки и бактериальные маты, сложенные чередующимися слоями гипбсита и псиломелана, каолинита и псиломелана, галлаузита и псиломелана с примесью гётита. Поверхность одних пленок ровная и гладкая, других – бугристая, представляющая собой комбинацию полусфер и их сегментов, что свойственно формам нахождения псиломелана. На рисунке 6d показана одна из эффективных паукообразных биоморфоз псиломелана. В его составе определены (ppm): Li – 840; Cr – 3673; V – 203; Co – 798; Zn – 2039; Pb – 143; Ba – 1049; Ce – 2350. Присутствие церия и других редких земель настолько характерно для псиломелана в корках выветривания, что было использовано в качестве геохимического способа поиска гипергенных месторождений этих элементов и было признано изобретением (Капусткин и др., 1989).

Роящие микроорганизмы создают в бокситах не только ходы и норы, но и, перемещаясь в пустотах – порах и кавернах, перерабатывают в своем пищеварительном тракте субстрат и биопленки. Продукты переработки выходят на поверхность пустот. По форме они похожи на продукты деятельности современных дождевых червей (рис. 7а, б). Различаются две основные формы этих ми-

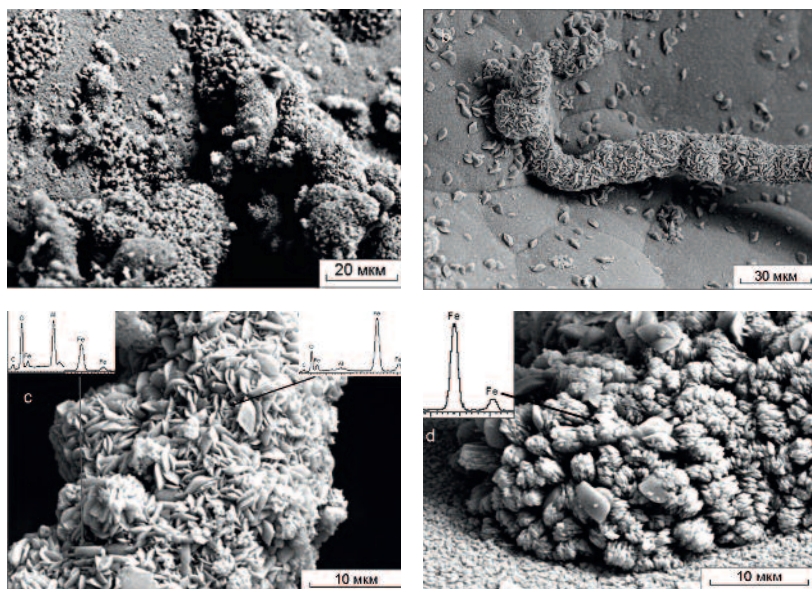


Рис. 7. Минералы раскристаллизованных продуктов пищеварительного тракта организмов на поверхности биопленок в кавернах бокситов (Лохардага, штат Бихар, Индия): а и b — биопленки, изрытые организмами и покрытые продуктами пищеварительного тракта; с и d — детали: в составе продуктов кристаллы гиббсита, сидерита, галуазита, кальцита и гематита. СЭМ.

неральных новообразований: червеобразные (рис. 7b, c) и кучеобразные (рис. 7a, d). Первые сложены кристаллами гиббсита и гематита, что видно по элементному составу на врезках, а также кальцита. Вторые — преимущественно гематитом с примесью гиббсита и кальцита.

Заключение

Как указывалось выше, изучение биопленок и продуктов взаимодействия живого органического вещества и биоты с косной материей горных пород и руд под электронным микроскопом началось около 30 лет назад. Около 20 лет назад развернулось широкое исследование биоморфных структур в гипергенных породах: фосфоритах, марганцевых рудах, бокситах (Школьник и др., 2004) и других. Латеритные бокситы как объект исследования обладают рядом достоинств, бесценных для познания процессов гипергенного рудообразования. Бокситы — продукт тропического климата и мощнейшего воздействия органического мира. Они представляют собой результат высшей, конечной стадии выветривания, и латеритный профиль дает возможность проследить и выявить минералы генетического ряда от исходных алюмосиликатных пород до оксидов и гидроксидов алюминия, железа и других элементов-гидролизатов (Слукин и др., 2015). Данные, полученные при изучении минералогии, геохимии, биогеохимии, бактериальной палеонтологии бокситоносных латеритных профилей универсальны

и имеют большое значение для познания всех типов тропических кор выветривания.

Латеритные бокситы пропитаны и насыщены биопленками и бактериями, продуктами их минерализации и перекристаллизации. Образование минералов с участием бактерий происходит двумя способами: биологически вызванной минерализацией (БВМ) и биологически обусловленной минерализацией (БОМ) (Frankel, Bazylinski, 2003). При БВМ в анаэробных условиях многие бактерии взаимодействуют с различными металлами, включая железо. Метаболические продукты этих взаимодействий являются акцепторами в переносе электронов, очень активны и участвуют в последующем минералообразовании. При БОМ минералы осаждаются на органической матрице или на пузырьках внутри клетки, позволяя организму в значительной степени осуществлять контроль за образованием и ростом минералов и таким образом над их составом, размером, габитусом и внутриклеточном положением. Минерализация аморфных веществ в присутствии биоты происходит гораздо быстрее. Результаты наших наблюдений выявили формы преобразований железистых биопленок и бактерий в биоморфозы, а затем в продукты полной кристаллизации вплоть до образования гематитовых «железных роз».

Алюминий образует моноэлементные биопленки или в смеси с железом, местами, с марганцем, кремнием и другими элементами. В обстановке полного перемалывания роящими организмами бокситового матрикса

продукты их пищеварительного тракта и биопленки поразительно быстро перекристаллизовываются и превращаются в самые крупные и совершенные кристаллы гиббсита. Биоморфозы по корням растений состоят из скрытокристаллического гиббсита, но в порах и кавернах, а также по корневым волоскам развиты мелкие кристаллы. Марганец фиксируется в биопленках и образовавшемся из них псиломелане и, судя по публикациям (Bardossy, Aleva, 1990), местами, в литиофорите. Каждый из перечисленных элементов в бокситах образует собственные минералы, хотя их скрытокристаллические метаклоидные разновидности сорбируют ряд других химических элементов: Ti, REE, Ba, Cu, Mg, Si, U, Th и другие в количествах до 10%. Только на границе гиббсита и растворяющегося кварца отмечено образование галлуазита $Al_2[Si_2O_5OH]_4 \cdot 2H_2O$. Установлено, что продукты перекристаллизации пищеварительного тракта роющих организмов в норах и ходах преимущественно мономинеральны и сложены гиббситом с незначительной примесью реликтовых каолинита и кварца (в кислых породах). Те же продукты в свободных пространствах каверн на поверхности биопленок полиминеральны и состоят из гематита, гиббсита и кальцита. Появление карбонатов объясняется насыщенностью продуктов жизнедеятельности органикой и поступлением кальция с капиллярными водами, поднимающимися во время сухих сезонов. Показателен тот парадоксальный факт, что вместе с кальцием мигрируют все растворенные химические элементы. Достигая поверхности, они фиксируются на испарительном барьере, где нами определены максимальные концентрации CaO до 14% и SiO₂ до 25% при нулевых содержаниях в нижележащих многометровых толщах бокситов.

Казалось бы, что деятельность микро- и мезофлоры и фауны незначительна, и ее масштабы ничтожно малы. В действительности, история изучения процессов и продуктов взаимодействия органического мира и горных пород и результаты наших исследований (Вернадский, 1934; Вологдин, 1947; Чухров и др., 1975; Школьник и др., 2004; Слукин и др., 2014; Slukin *et al.*, 2015; Druschel, Kappler, 2015; Tazaki, 2006; Theng, 2008) показывают, что это взаимодействие является участником грандиозного геологического процесса, изменяющего лик Земли и приводящего к образованию важнейших жизненно необходимых полезных ископаемых и почв. Процессы выветривания идут непрерывно и сопровождаются синхронной частичной денудацией. Таким

образом, продукты латеритизации и денудации, а, значит, и все ассоциирующие с ними осадочные месторождения полезных ископаемых подвергались воздействию органического мира.

Литература

- Бактериальная палеонтология / Ред. Розанов А.Ю. М.: ПИН РАН. **2002**. 188 с.
- Боева Н.М., Бортников Н.С., Новиков В.М., Слукин А.Д. Синхронный термический анализ и его возможности в изучении гипергенных минералов // Приоритетные и инновационные направления литологических исследований. Мат. 9 Уральского литологического совещ. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН. **2012**, С. 18 – 19.
- Боева Н.М., Жегалло Е.А., Соболева В.С., Бортников Н.С., Новиков В.М., Слукин А.Д. Синхронный термический и электронно-микроскопические методы и их возможности в изучении гипергенного минералообразования // Актуальные проблемы геологии, прогноза, поисков и оценки месторождений твердых полезных ископаемых. Мат. междунар. науч.-практ. конф. Симферополь-Судак. 17 – 23 сентября 2012 г. Киев: Академпериодика. **2012**, С. 120 – 121.
- Вернадский В.И. Очерки геохимии. М.-Л.-Грозный-Новосибирск: Горгеофтеиздат. **1934**. 382 с.
- Вологдин А.Г. Геологическая деятельность микроорганизмов // Изв. АН СССР. Сер. Геол. **1947**. №3. С. 19 – 36.
- Геккер Р.Ф., Ушаков Б.В. Vermes. Черви. Основы палеонтологии. М.: АН СССР. Т. 2. **1962**. С. 435 – 466.
- Громов А.В., Усман Баба Камара, Слукин А.Д. Рентгенофазовый анализ бокситов – возможности и перспективы использования при разведке месторождений Гвинеи // Геология и разведка. Изв. вузов. **1991**. С. 49 – 57.
- Ивашов П.В. Биогеохимия внутрипочвенного выветривания. М.: Наука. **1993**. 380 с.
- Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах (Ред. Розанов А.Ю., Ушатинская Г.Т.). М.: ПИН РАН. **2011**. 172 с., 71 фототаблица.
- Капусткин Г.Р., Слукин А.Д., Зибарова Ю.Ф., Шенкман Е.Я., Сивцов А.В. Способ геохимических поисков месторождений редких земель экзогенных рудообразующих систем. Авторское свидетельство №1497602. Гос. Комитет СССР по делам изобретений и открытий. М. **1989**.
- Розанов А.Ю. Микробный мир прошлого и специфика некоторых геологических и минералогических процессов // Минералогия и жизнь: происхождение биосферы и коэво-

- люция минерального и биологического миров, биоминералогия. Мат. IV Междунар. Минерал. Сем. Сыктывкар: Ин-т геологии Коми НЦ УрО РАН. **2007**. С. 61 – 62.
- Слукин А.Д. Белье латеритные бокситы как продукт сезонных изменений окислительных и восстановительных условий в процессе выветривания // Докл. АН СССР. **1983**. Т. 272. №1. С. 166 – 170.
- Слукин А.Д. Латеритизированные карбонаты и ассоциирующие с ними осадочные каолины и бокситы с высокими содержаниями REE, Nb, Ti и других элементов (Чадобецкое поднятие, Сибирская платформа) // Прикладная геохимия. Вып. 7. Кн. 2. Генетические типы месторождений. М.: ИМГРЭ. **2005**. С. 206 – 221.
- Слукин А.Д., Киреев Ф.А., Беляев В.И., Звездинская Л.В. Некоторые результаты изучения латеритных продуктов выветривания под сканирующим электронным микроскопом // Кора выветривания. **1986**. Вып. 19. С. 86 – 90.
- Слукин А.Д., Бортников Н.С., Новиков В.М., Жегалло Е.А., Боева Н.М., Школьник Э.Л. Биоминералы латеритных кор выветривания как продукты жизнедеятельности ископаемых организмов // Органическая минералогия. Мат. IV Рос. совещ. с межд. уч. Черноголовка: ИПФХ РАН. **2013**. С. 139 – 142.
- Слукин А.Д., Бортников Н.С., Жегалло Е.А., Жухлистов А.П., Боева Н.М. Гиббсит и каолинит в зоне биологической педотурбации латеритного профиля: разные судьбы (на примере месторождений Сибири, Индии, Гвинеи и Бразилии) // Докл. РАН. **2014**. Т. 458. №5. С. 572 – 577.
- Слукин А.Д., Бортников Н.С., Жухлистов А.П., Мохов А.В., Боева Н.М., Жегалло Е.А., Зайцева А.В. Микроморфология и генетические взаимоотношения главных гипергенных минералов бокситоносных латеритных профилей (по результатам электронно-микроскопического изучения) // Новые данные о минералах. **2015**. Вып. 50. С. 50 – 61.
- Чухров Ф.В., Ермилова Л.П., Балашихова В.В., Чуриков В.С., Горшков А.Н., Жухлистов А.П., Сидоренко О.В., Звягин Б.Б., Молева В.А., Унанова О.Г. Окислы железа – продукты молодых геологических процессов // Гипергенные окислы железа в геологических процессах. М.: Наука. **1975**. С. 91 – 111.
- Школьник Э.Л., Жегалло Е.А., Богатырев Б.А., Бутельский Ю.Ю., Слукин А.Д., Новиков В.М., Еганов Э.А., Георгиевский В.В., Жуков В.В., Мыскин В.И., Одокий Б.Н. Биоморфные структуры в бокситах (по результатам электронно-микроскопического изучения). М.: Эслан. **2004**. 184 с.
- Школьник Э.Л., Жегалло Е.А., Бутельский Ю.Ю., Новиков В.М., Слукин А.Д. Роль жизни в образовании одной из форм концентрации полезных ископаемых на планете Земля // Отечественная геология. **2016**. №1. С. 46 – 52.
- Юшкин Н.П. Новые биогеологические прорывы // Смирновский сборник – 2005. Фонд им. ак. В.И. Смирнова. М.: МГУ. **2005**. С. 55 – 68.
- Bardossy G., Aleva G.J.J. Lateritic bauxites. Budapest: Akademiai Kiado. **1990**. 624 p.
- Boeva N., Bortnikov N., Slukin A., Novikov V. The synchronous thermal analysis and its possibilities in studying of supergene minerals of Al-hydroxides // Book of abstracts of the 2nd Central and Eastern European Conference on Thermal Analysis and Calorimetry (CEEC-TAC2). Vilnius, Lithuania. 2013. P. 401.
- Boeva N.M., Bortnikov N.S., Novikov V.M., Slukin A.D., Bocharnikova J.I. Researches of bio-minerals of iron by a method of thermal analysis // AICAT.XXXVI National congress on calorimetry, thermal analysis and applied thermodynamics. Cagliari, Italy. **2014**. P. 58 – 59.
- Druschel G.K., Kappler A. Geomicrobiology and microbial geochemistry // Elements. **2015**. Vol. 11. №6. P. 389 – 394.
- Frankel R.B., Bazylinski D.A. Biologically induced mineralization by bacteria // Rev. Mineral. Geochem. **2003**. V. 54. P. 95 – 114.
- Slukin A.D. Bauxite deposits with unusually high concentrations of REE, Nb, Ti and Th, Chadobets Uplift, Siberian Platform // Int. Geol. Rev. **1994**. V. 36. P. 179 – 193.
- Slukin A.D., Boyarskaya R.V., Nandi A.K. Mineralogy of lateritic products and bauxites of khondalites, Eastern Ghats, India // Weathering; its Products and Deposits. Vol. II. Products – Deposits – Geotechnics. Athens: Theophrastus Publications, S.A. Zographou. **1989**. P. 101 – 112.
- Slukin A.D., Bortnikov N.S., Zhegallo E.A., Zaytseva L.V., Zhukhlistov A.P., Mokhov A.V., Boeva N.M. Biomineralization in bauxitic laterites of modern- and paleotropics of Earth // Biogenic-Abiogenic Interactions in Natural and Anthropogenic Systems / Eds: O.V. Frank-Kamenetskaya, E.G. Panova, D.Yu. Vlasov. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer. **2015**. P. 67 – 74.
- Tazaki K. Clays, microorganisms and biomineralization // Handbook of Clay Sciences. Vol. 1. Developments in Clay Science / Ed. by F. Bergaya, B.K.G. Theng, G. Lagaly. Amsterdam: Elsevier Ltd. **2006**. P. 477 – 497.
- Theng B.K.G. Clay-organic interactions // Encyclopedia of Soil Science / Ed. By W. Chesworth. Berlin-Heidelberg-N.Y.: Springer. **2008**. P. 144 – 150.