

ТИПОМОРФНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛОМОРФОЛОГИИ ГИББСИТА ЛАТЕРИТНЫХ БОКСИТОВ КАК ПОКАЗАТЕЛИ ЕГО ГЕНЕЗИСА

А. Д. Слукин

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии,
минералогии и геохимии Российской Академии Наук, Москва*

Поступила в редакцию 30 октября 2017 г.

Аннотация: в результате изучения под СЭМ и ПЭМ было обнаружено большое разнообразие форм гиббсита $Al(OH)_3$ в зависимости от места нахождения в латеритном профиле, генезиса и воздействия органического вещества. В нижних частях профиля преобладают толстотаблитчатые псевдогексагональные двойники по (001), образующие псевдоморфозы по алюмосиликатам. В кавернах сформировались друзы длиннопризматических и пирамидальных кристаллов. В верхней части профиля в зоне биологической педотурбации биоминеральные пленки вокруг каждого зерна кварца превратились в покров из гексагональных табличек гиббсита, сдвойникованных по (100) и (110). Роющие организмы разрушают все кристаллы. Продукты их пищеварительного тракта перекристаллизованы и превращены в протяженные друзы совершенных кристаллов биогиббсита, сдвойникованных по нескольким сложным законам.

Ключевые слова: латеритные бокситы, биогенные минералы, биопленки, органическое вещество, биопедотурбация, типоморфизм гиббсита.

TYPOMORPHIC PECULIARITIES OF CRYSTALLOMORPHOLOGY OF GIBBSITE FROM LATERITIC BAUXITES AS A GENESIS INDICATOR

Abstract: as a result of the study under SEM and TEM, a wide variety of forms of gibbsite $Al(OH)_3$ was found, depending on the location in the lateritic profile, genesis and exposure to organic matter. In the lower parts of the profile, thickly-plateleted pseudo-hexagonal twins (001) predominate, forming pseudomorphs over aluminosilicates. Druses of long-prismatic and pyramidal crystals were formed in the caverns. In the upper part of the profile in the zone of biological pedoturbation, biomineral films around each grain of quartz have turned into a cover of hexagonal gibbsite plates, twinned in (100) and (110). Digging organisms grind all the crystals. The products of their digestive tract are recrystallized and converted into extended druses of perfect biogenic gibbsite crystals, twinned according to several complex laws.

Key words: lateritic bauxites, biogenic minerals, biofilms, organic substance, biopedoturbation, typomorphism of gibbsite.

Гиббсит $Al(OH)_3$ – главный, и часто единственный минерал алюминия в латеритных бокситах мезозойского и кайнозойского возраста, представляющих большую часть мировых запасов. В латеритных бокситах на траппах его сопровождает бемит $AlO(OH)$, местами в равных количествах. В палеозойских латеритах преобладает бемит, а в протерозойских и архейских – диаспор $\alpha-AlO(OH)$ и корунд Al_2O_3 [1]. Изучение кристалломорфологии минералов глинозема является необходимым этапом в познании их минералогии и генезиса.

Морфология кристаллов гиббсита изучалась мно-

гими исследователями. В одном из самых обширных минералогических обзоров приведены графические рисунки простейших форм кристаллов гиббсита в виде гексагональных табличек и нескольких двойников [2], но нет изображений их природных форм. Вплоть до последней четверти XX века описания форм кристаллов гиббсита и других гипергенных минералов кор выветривания (КВ) ограничивались возможностями световых микроскопов, и основная масса минерального и органоминерального вещества, сложенная нано- и микрогабаритными частицами, оставалась вне поля зрения. К этому времени стали появ-

ляться первые изображения форм кристаллов, снятых под просвечивающим электронным микроскопом (ПЭМ). Объемные формы гипергенных минералов стали доступны для наблюдения под сканирующим электронным микроскопом (СЭМ). Тогда же были опубликованы фотографии отдельных кристаллов гиббсита [3–11]. Наблюдения за продуктами взаимодействия горных пород и биоты позволили установить формы нахождения биоминералов [12].

Целью настоящей работы является показать кристалломорфологию гиббсита в зависимости от условий и места образования, особенно в зоне самого активного воздействия биоты. Здесь мы ограничиваемся результатами изучения только латеритных бокситов, основанных на нескольких тысячах фотоснимков. Исследования проводились с помощью сканирующих электронных микроскопов CamScan-4 (Cambridge) и TESCAN VEGA IXMU (Tescan) и просвечивающего (ПЭМ) JEM 2100 (JEOL, Япония) при ускоряющем напряжении 200 кВ микроскопов, установки синхронного термического анализа STA 449 F1 Jupiter (чувствительность весов 25 нг, скорость нагревания образцов – 10 °/мин).

Объектами исследования явились образцы латеритных бокситов из месторождений на Сибирской платформе (Центральное и Ибджибек на Чадобецком поднятии, Татарское на Енисейском кряже), на Индостанской платформе (Саппарла и Гудем в Восточных Гатах, Падувар, Палайангади и Бельгаум в западной части, Амаркантак в центральной части платформы), на Африканской платформе (Сангареди), в Бразилии (Посус ди Калдас).

Изученные объекты охватывают самые мощные (до 150–600 м) латеритные профили на магматических, метаморфических и осадочных породах. Все они имеют зональное строение, включая зоны дезинтеграции глинистых минералов (аллофана, галлуазита, монтмориллонита и каолинита) и минералов оксигидроксидов Al и Fe (гиббсита, бемита, гетита, гематита). Морфология каждого из этих минералов и их последовательные переходы в генетическом ряду продемонстрированы ранее [9].

Верхняя зона разделена на два горизонта: бокситовый и собственно латеритный. Обычно она сложена скальными породами мощностью 1–10, максимум 54 м. Ее боковые края часто ограничены обрывами и скалами. По нашим наблюдениям, вертикальные клиновидные трещины пересекают латериты и бокситы и достигают каолинов. Трещины заполнены осыпавшимися обломками латеритов и бокситов, что свидетельствует о возможности быстрого и глубокого проникновения дождевых вод и биоты в толщу выветривающихся пород.

Поверхность латерита покрыта сплошной непроницаемой для глаз войлокоподобной органоминеральной пленкой. Она состоит из плотно переплетенных корней древесной, кустарниковой и травяной растительности и гифов грибов, включающих обильные минеральные частицы. Под СЭМ хорошо видно,

что среди них смешаны органические остатки разной степени сохранности, густо заселенные бактериями. Древесные корни проникают на глубину до 10 м и среди них есть как живые, так и отмершие остатки. Таким образом, по крайней мере, до глубины 10 м латериты и бокситы подвержены воздействию биохимически активных веществ. Несомненно, это воздействие проникает глубже, хотя и в ослабленной степени. Максимальное влияние органики имеет место в верхних 100 см латеритного профиля в так называемой зоне биологической педотурбации [10]. Эта зона кишит бактериями и роющими организмами, оставившими свои следы в виде биоморфоз и бесчисленных ходов червей и других представителей микро- и мезофауны. Деятельность роющих организмов измеряется сроком их жизни, составляющим 2–3 года, а периоды развития и существования латеритов – тысячи-миллионы лет. За это время латериты и бокситы многократно подвергаются биомеханической переработке до такой степени, что в матриксе не сохраняется ни одного целого кристалла гиббсита.

Описание кристалломорфологических особенностей гиббсита целесообразно начать с нижней части бокситового горизонта, которая подверглась минимальному воздействию биоты. Среди преобладающих псевдоморфных руд в них встречаются гнезда белого скрытокристаллического фарфоровидного гиббсита объемом в несколько кубических дм. Под СЭМ видно, что гиббсит имеет форму гексагональных изометрических табличек. Матрикс базальта превратился в скопления разноориентированных псевдогексагональных таблитчатых кристаллов гиббсита (рис. 1). Иначе выглядят псевдоморфозы гиббсита по вкрапленникам лабрадора (рис. 2). Индивидуальные кристаллики находятся в виде вытянутых гексагональных табличек размером от 1,5x0,9 до 7x2 мкм. Они сгруппированы в цепочки, вытянутые вдоль двойниковых полосок плагиоклаза. Наиболее крупные, хорошо образованные кристаллы находятся в высокопористых бокситах на кварц-алюмосодержащих породах: кондалитах, гнейсах, гранитах. Может показаться парадоксом факт, что самые крупные, до 1 см, кристаллы гиббсита развиты по почти полностью растворенным жилкам кварца, секущим кондалиты Индии (рис. 3). Химический состав гиббсита в масс. %: Al₂O₃ – 65,54, SiO₂ – 0,22, Fe₂O₃ – 0,26, Na₂O – 0,04, ППП – 33,74. Термическая кривая характерна для хорошо окристаллизованных гиббситов из латеритных бокситов. Она имеет два эндотермических эффекта, связанных с дегидроксилизацией гиббсита: незначительный (максимум при 310°C) и глубокий (максимум при 380°C). Также на кривой присутствует эндоэффект с максимумом при 570°C, связанный с дегидроксилизацией образованного при нагревании бемита.

Своеобразны формы кристаллов гиббсита в псевдоморфозах по железистым алюмосиликатам. Собственно метаморфозы по моноклинным минералам представляют собой систему параллельных пластинок, расчлененных конгруэнтными пористыми про-

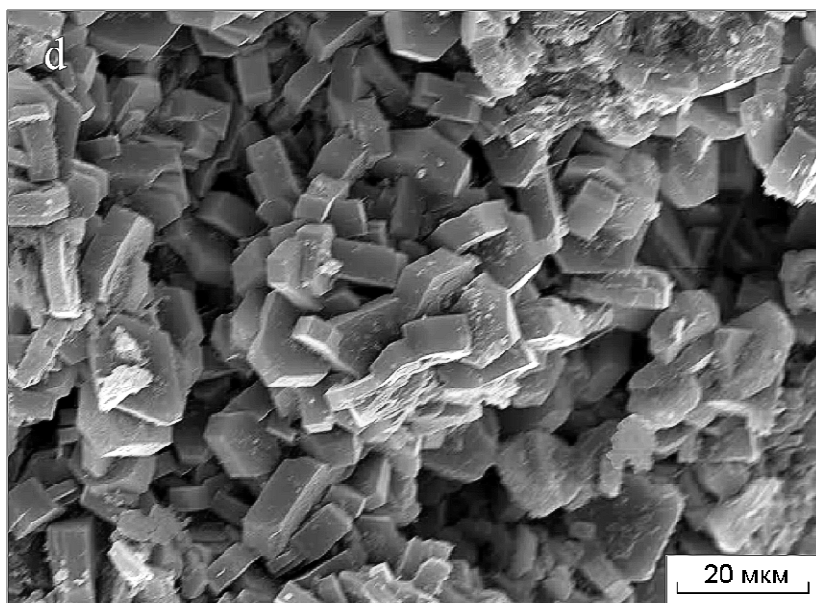


Рис. 1. Скопления кристаллов гиббсита. СЭМ.

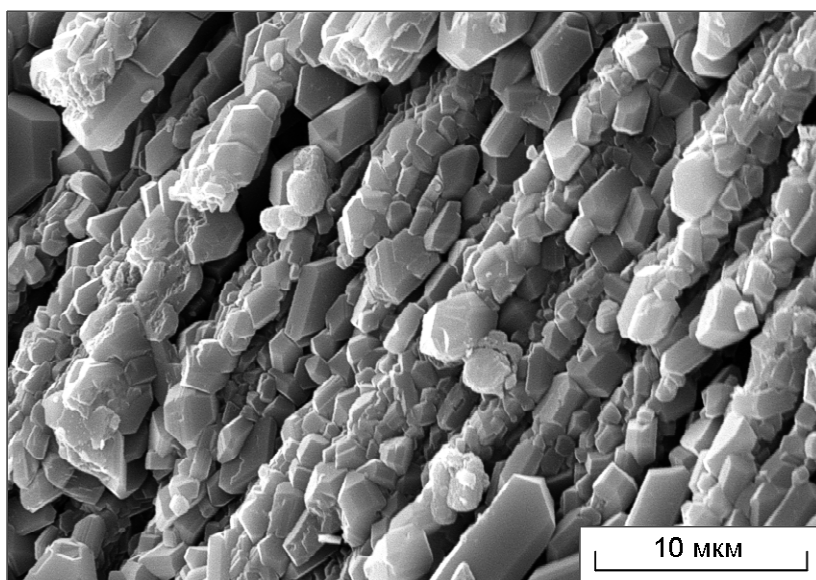


Рис. 2. Псевдоморфоза гиббсита по плагиоклазу. СЭМ.

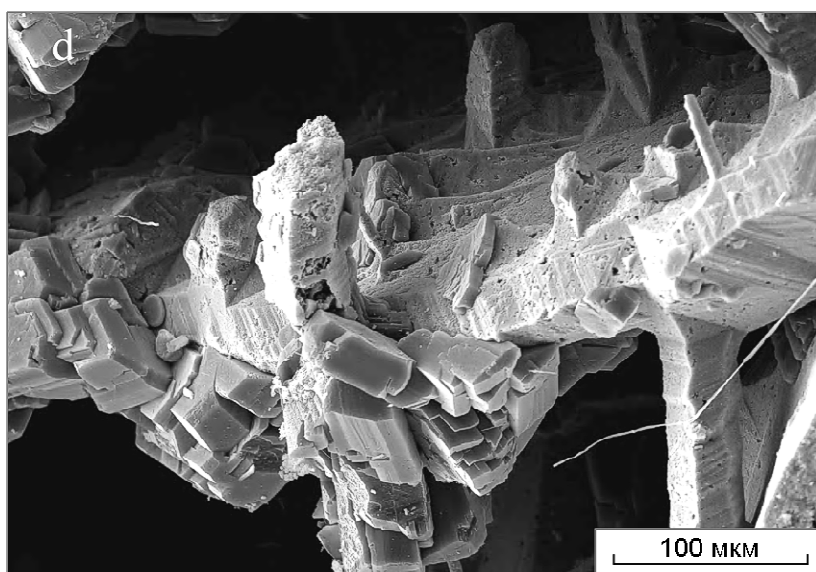


Рис. 3. Кристаллы гиббсита на останцах растворения кварца. СЭМ.

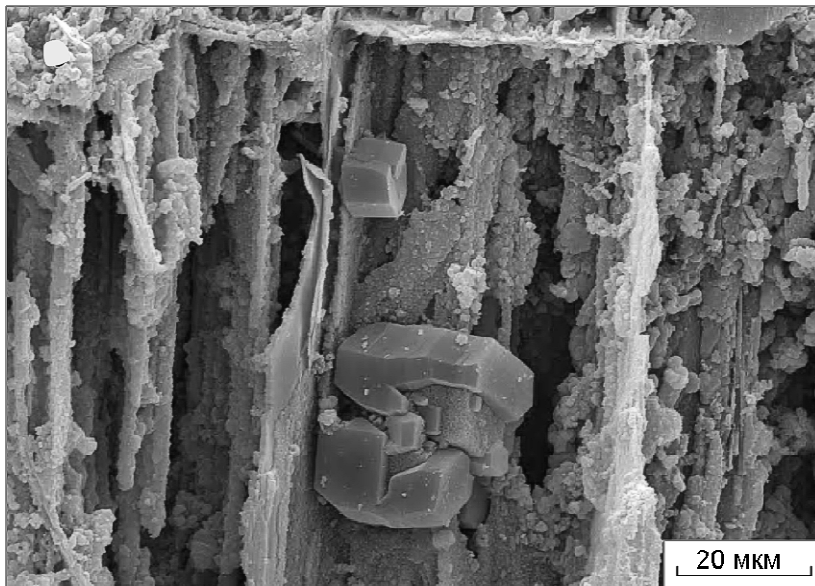


Рис. 4. Сложные кристаллы гиббсита в псевдоморфозах по арфведсониту. СЭМ.

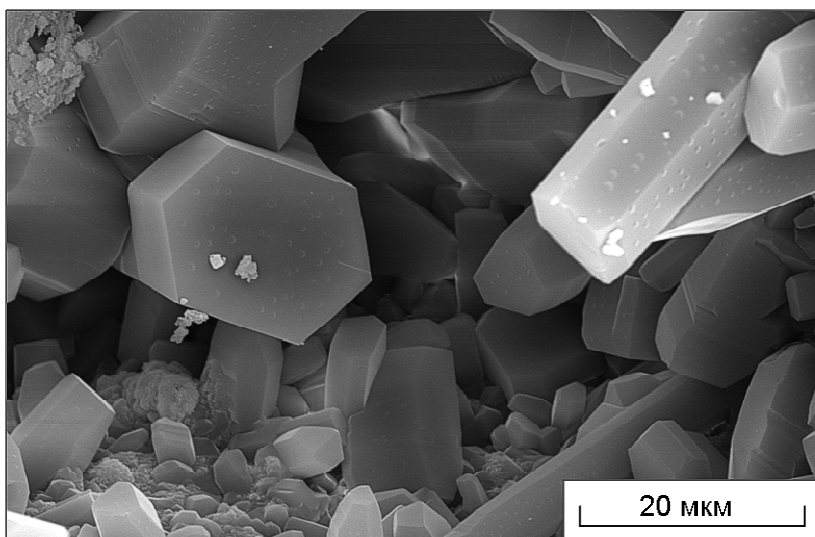


Рис. 5. Гиббсит в каверне латеритной КВ. СЭМ.

странствами. В порах находятся сложные сростки кристаллов гиббсита размером до 30 мкм (рис. 4). Гранаты, обладающие несовершенной спайностью или вообще лишенные ее, тем не менее, обычно покрыты густой сетью трещин. В бокситах по трещинам образуются стенки ячеек из гематита, размером до 250 мкм, а также сростки гексагональных столбчатых кристаллов гиббсита размером до 150 мкм. Таким образом, при латеритном выветривании железистых алюмосиликатов происходит дифференциация алюминия и железа, и образование их индивидуальных минералов.

В свободных пространствах пор и каверн вне псевдоморфоз образовались щетки совершенных длиннопризматических и пирамидальных кристаллов гиббсита (рис. 5).

В зоне биологической педотурбации обращает на себя внимание обилие биоминеральных пленок. Биопленки – это совокупность микробных клеток, других мельчайших частиц и внеклеточного полимерного органического вещества. По нашим наблюдениям и

анализам, химический состав биопленок характеризуется широким разнообразием. Они покрывают все минералы латеритов: гиббсит, бемит, гематит, гетит, каолинит, галлуазит, псиломелан, кварц и другие. Существуют однослойные и многослойные покровы, причем последние составляют единый комплексный покров. Исключение составляют пленки на зернах кварца. На псевдоморфозах алюмосиликатных и силикатных минералов пленки занимают стабильное положение. На кварце пленка обволакивает зерна, минерализуется и фиксируется. При дальнейшем растворении кварца и уменьшении размера зерна образуется вторая и третья пленки, разделенные конгруэнтными пустыми пространствами. Вид и состав пленок зависит от их возраста. Возраст пленок в современных латеритах может измеряться днями, годами и миллионами лет. Среди наших объектов были такие, в которых находились пленки возрастом как 50 лет (пов Кач, Индия), так и старше 30 миллионов лет (Чадобецкое поднятие). Степень их преобразования весьма различна (рис. 6). Постепенно возникающие

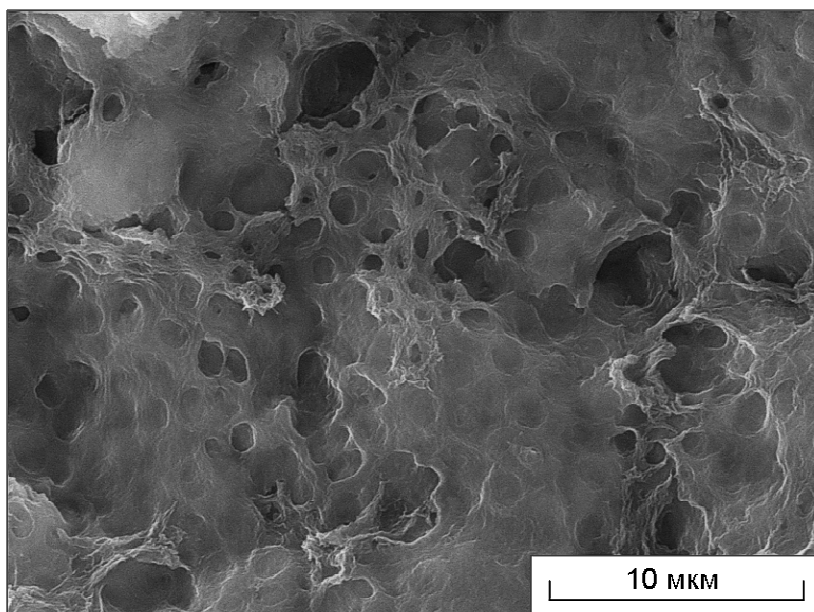


Рис. 6. Кристаллы гиббсита среди биопленок. СЭМ.

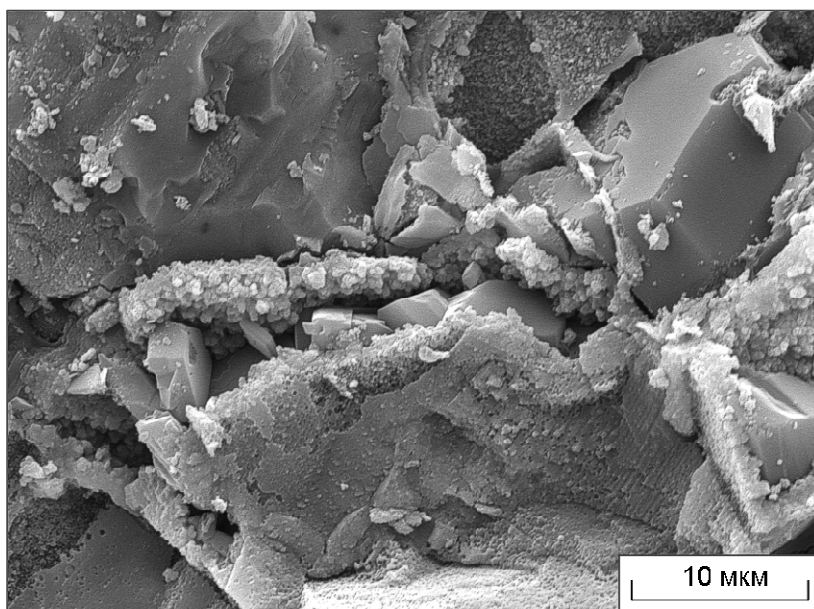


Рис. 7. Совершенные кристаллы гиббсита среди биопленок. СЭМ.

неровности обретают четкие формы и превращаются в щетки кристаллов гиббсита. Одни из них образуют комбинации сдвойникованных по (100) и (010) одномерных гексагональных таблитчатых кристаллов (рис. 7), другие – комбинации равномерных: от наноразмерных до 1 мм кристаллов, беспорядочно ориентированных. Самые мелкие из них представляют собой простые гексагональные таблички.

Особый интерес представляют латеризированные прибрежно-морские отложения Малабарского побережья Индии. Они являются продуктами переотложения каолинизированных пород, которые были снесены в Аравийское море, сформировав свиты Квилона и Варкала, сложенные морскими, лагунными и речными фациями. Отличительной особенностью материнских пород этих профилей и образовавшихся по ним бокситам, является самая высокая насыщенность биотой,

включая янтарь, лигнит, множество разнообразных бактерий, водорослей, остатков наземной растительности и других. Все это явилось благоприятной средой для обильного развития биопленок, которые облекают все зерна минералов (рис. 8). Гиббсит образует кристаллы размером 1–3 мкм в форме толстостолбчатых гексагональных призм. Вокруг зерен кварца биопленки превращаются в щетки тонкотаблитчатых кристаллов гиббсита, образующих двойниковые сростки по (100) и (110).

Обнаружены следы и продукты взаимодействия живых организмов на латериты. В зоне биологической педотурбации латериты кишат роющими организмами: червями, нематодами, термитами, муравьями и др. Прокладывая свои ходы, они полностью разрушают субстрат латерита до такой степени, что в нем не остается ни одного целого кристалла гиббсита,

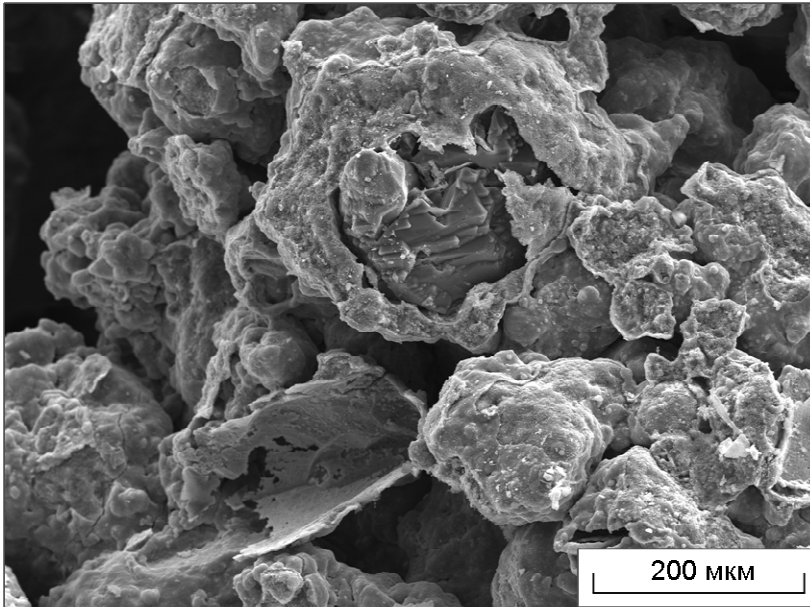


Рис. 8. Биопленки, облегающие минералы аллювиальных отложений. СЭМ.

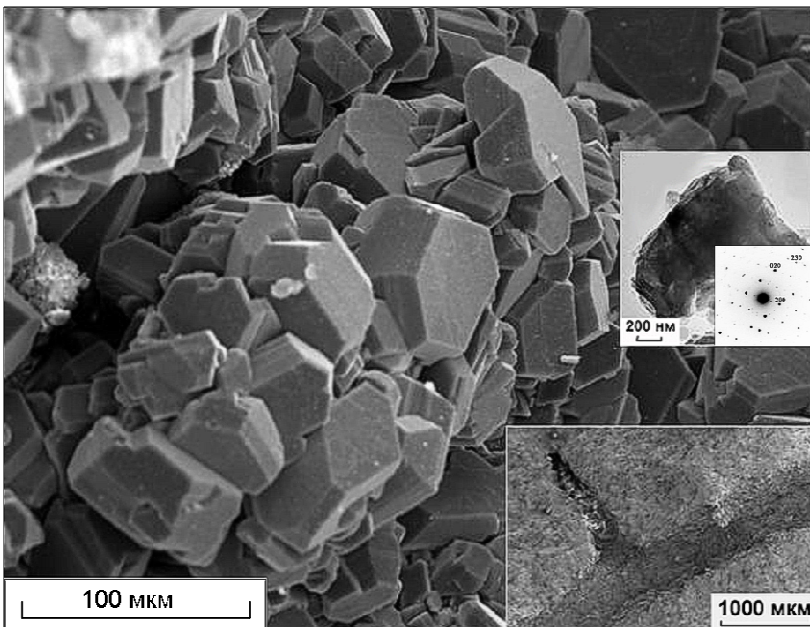


Рис. 9. Друзы кристаллов гиббсита в ходах червей в латеритах. СЭМ. На врезках: общий вид, СЭМ, вид частицы гиббсита и его электронограмма, ПЭМ.

но только своего рода микрошебень. Тем удивительнее выглядит картина внутреннего содержания ходов. Свежепрорытые ходы заполнены комочками переработанного субстрата, прошедшего через пищеварительный тракт организма. Такая картина полностью соответствует той, которую мы наблюдаем в ходах дождевых червей. В более старых ходах на поверхности комочков появляются отдельные таблитчатые гексагональные кристаллики гиббсита. Редкие реликты каолинита корродированны, растворены и замещены гиббситом. В наиболее старых ходах вся цепь комочков перекристаллизована и превращена в сплошную протяженную друзу совершенных изометрических кристаллов гиббсита (рис. 9). Эти кристаллы sdвойникованы по сложным законам.

Заключение

Результаты нашей работы показывают многообразие типоморфных особенностей кристалломорфологии гиббсита в зависимости от глубины места его образования в латеритном профиле и, следовательно, мощности воздействия на него биологического и биогеохимического фактора. Через интенсивный поток фильтрующихся дождевых и почвенных вод влияние биоты доходит до горизонта бокситов и каолинов, хотя и в ослабленном виде. Поэтому образцы гиббсита из части бокситового горизонта представляются продуктом среды с минимальным влиянием биоты и, обычно, без видимых явных следов ее воздействия. Образцы гиббсита из зоны биологической педотурбации – продукт максимального воздействия биологического фактора во всем его многообразии.

Как показали результаты нашего исследования, в нижней части бокситов гиббсит имеет наиболее простые формы. При латеритизации кристаллы гиббсита становятся толще за счет полисинтетического двойникования и сложнее. При выветривании полевых шпатов, большинство которых сами являются полисинтетическими двойниками, кристаллы гиббсита образуют цепь тонких гексагональных табличек, с базопинакоидом, конгруэнтно удлинённым вдоль двойниковых полосок. При выветривании полисинтетических двойников каолинита, таблички гиббсита также конгруэнтно развиваются между его пластинками и обрамляют их снаружи. В железистых алюмосиликатах при латеритизации происходит дифференциация Al и Fe с образованием минералов гетитового и/или гематитового состава и сложных двойников толстотабличчатых и призматических кристаллов гиббсита. От состава материнских горных пород зависит морфология кристаллов гиббсита. Так, для кондалитов и амфиболитов характерны кристаллы гиббсита с удлинённым базопинакоидом, для базальтов, долеритов, гранитов, нефелиновых сиенитов, тингуаитов – изометричные гексагоны, но все же отличающиеся друг от друга по толщине и взаимному расположению.

В зоне биологической педотурбации спокойные условия минералообразования резко изменились и приобрели дифференцированный характер, зависящий от общего фронтального воздействия дождевых вод, биоты и температуры до локального влияния конкретных бактерий, пленок, микро-, мезо- и макрофлоры и фауны. Здесь выделяются простейшие формы кристаллов гиббсита в виде псевдогексагональных пластинок, облекающих коккоидные формы микрофауны, местами образуя «каменные цветы».

Роющие организмы разрушают весь матрикс латерита, превращая его в щебень. Обломки кристаллов гиббсита являются типоморфными для зоны биологической педотурбации. В ходах червей под воздействием высокоактивных биохимических веществ обломки перекристаллизованы в необычно совершенные кристаллы гиббсита. Наиболее простыми среди них являются толстостолбчатые или короткопризматические гексагональные кристаллы, но наиболее распространены сдвойникованные по сложным законам.

Работа выполнена при поддержке госзадания ИГЕМ РАН № 0136-2014-0004. Автор благодарит Н. М. Боеву за проведение термического анализа, А. П. Жухлистова, Е. А. Жегалло, Л. В. Зайцеву за снимки, полученные на электронных микроскопах.

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской Академии Наук (ИГЕМ РАН), Москва

Слукин Анатолий Данилович, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, профессор

Тел.: +7-495-230-8224; E-mail: slukin1937@mail.ru

ЛИТЕРАТУРА

1. Биоминералы латеритных бокситов – новые данные по результатам электронно-микроскопического изучения / А. Д. Слукин [и др.] / Новые данные о минералах. – 2016. – В.51. – С. 52–61.
2. *Минералы. Справочник* / Ф. В. Чухров, Э. М. Бонштедт-Куплетская – Том II. Вып. 3. М.: Наука, 1967. – С. 607–618.
3. Биогенный наномагнетит в кирасе бокситоносной коры выветривания базальтов Южного Вьетнама / Н. С. Бортников [и др.] // ДАН, 2013. – Т. 451. – № 2. – С. 207–210.
4. *Экзогенные рудообразующие системы кор выветривания* / Ю. Ю. Бугельский [и др.] – М.: Наука, 1990. – 244 с.
5. Биогенные наноминералы оксидов железа в корах выветривания базальтов континентальных окраин Азии на примере Дальнего Востока России и Вьетнама. Статья 2. Гематит / В. М. Новиков [и др.] // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 2016. – № 4. – С. 23–30.
6. Кобы выветривания и связанные с ними полезные ископаемые / А. Д. Савко [и др.] // Воронеж: Истоки, 2007. – 355 с.
7. Микроморфология и генетические взаимоотношения главных гипергенных минералов бокситоносных латеритных профилей (по результатам электронно-микроскопического изучения) / А. Д. Слукин [и др.] // Новые данные о минералах. – 2015. – В.50. – С. 50–61.
8. *Slukin, A. D. Mineralogy of lateritic products and bauxites of khondalites, Eastern Ghats, India* / A. D. Slukin, R. V. Boyarskaya, A. K. Nandi // *Weathering; its Products and Deposits. Vol. II. Products – Deposits – Geotechnics.* Athens: Theophrastus Publications, S. A. Zographou. – 1989. – P. 101–112.
9. Biomineralization in bauxitic laterites of modern- and paleotropics of Earth / A. D. Slukin [et al.] // *Biogenic - Abiogenic Interactions in Natural and Anthropogenic Systems* / Editors: Frank-Kamenetskaya, Olga V., Panova, Elena G., Vlasov, Dmitry Yu. – 2015. – Springer. – P. 67–75.
10. Гиббсит и каолинит в зоне биологической педотурбации латеритного профиля: разные судьбы (на примере месторождений Сибири, Индии, Гвинеи и Бразилии) / А. Д. Слукин [и др.] // ДАН. 2014. – Т. 458. – № 5. – С. 572–577.
11. Biomineralization in bauxitic laterites of modern – and paleotropics of earth / A. D. Slukin [et al.] // *Biogenic - abiogenic interactions in natural and anthropogenic systems. V International Symposium.* Saint Petersburg: VVM Publishing Ltd. – 2014. – С. 90–91.
12. Биоморфные структуры в бокситах (по результатам электронно-микроскопического изучения) / Э. Л. Школьник [и др.]. М.: Эслан, 2004. – 184 с.

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow

Slukin A.D., Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, senior researcher, professor

Tel.: +7-495-230-8224

E-mail: slukin1937@mail.ru