

УДК 553.068.368+553.492.1+551.432.88

## ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ТИПИЗАЦИЯ БОКСИТОВ ПРОВИНЦИИ ФУТА ДЖАЛЛОН-МАНДИНГО (ЗАПАДНАЯ АФРИКА) ПО ТЕКСТУРНО-СТРУКТУРНЫМ ОСОБЕННОСТЯМ

© 2024 г. Д. А. Внучков<sup>а, \*</sup>, Н. М. Боева<sup>а, \*\*</sup>, М. А. Макарова<sup>а</sup>, Е. С. Шипилова<sup>а</sup>,  
В. И. Мамедов<sup>а</sup>, Н. С. Бортников<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,  
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

\*E-mail: dim89060471812@mail.ru

\*\*E-mail: boeva@igem.ru

Поступила в редакцию 13.10.2023 г.

После доработки 15.03.2024 г.

Принята к печати 18.03.2024 г.

В процессе формирования классических латеритных бокситов в провинции Фута Джаллон-Мандинго благодаря сложному двух-трехстадийному генезису сформировались отличные по внешним признакам, цвету, текстуре, структуре, литолого-генетические типы бокситов. Предлагаемая генетическая типизация бокситов, основанная на текстурно-структурных особенностях пород, фактически является основой для геолого-промышленной классификации месторождений региона. Изучение текстурно-структурных особенностей бокситов — это путь, благодаря которому можно составить представление об условиях их образования. Именно в текстурах и структурах руд запечатлена их генетическая история. Установлено, что месторождения, в пределах которых преобладают залежи осадочно-латеритных и химически-преобразованных бокситов, отличаются не только большими мощностями рудных тел и значительно более высоким содержанием общего глинозема в рудах, но и повышенными содержаниями моногидратных форм алюминия. Это определяет и различные экономические показатели эксплуатации и технологий металлургического передела бокситов.

*Ключевые слова:* Фута Джаллон-Мандинго, бокситы, текстурно-структурные особенности, генетические типы бокситов

**DOI:** 10.31857/S0016777024040045, **EDN:** casoog

### ВВЕДЕНИЕ

Бокситы — сырье для производства алюминия. Текстурно-структурные особенности различных литологических типов бокситов в значительной степени отражают особенности условий и механизмы их образования и позволяют прогнозировать кондиционность бокситов уже на стадии первичной разведки. Разрозненные данные о текстурах и структурах бокситов существуют в работах Е.В. Рожковой, Г.И. Бушинского, Ю.К. Горецкого и др. (Bardossy, Aleva, 1990). Специальных работ, посвященных анализу текстурно-структурных особенностей бокситов с генетической точки зрения, в геологической литературе не существует. М.В. Пастухова на основании изучения структурных особенностей бокситов выделила группы месторождений, связанных общими чертами сходства и различия. Были отражены главные

текстурно-структурные особенности основных типов бокситов платформенных месторождений. Было отмечено, что классифицировать бокситы по текстурно-структурным особенностям можно только с учетом взглядов на генезис, которых придерживается исследователь. При изучении бокситов расшифровка структуры позволяет установить характеристики исходного материала, способ его разрушения, переноса, накопления и дальнейшего преобразования. Текстура бокситов также свидетельствует об условиях накопления исходного или собственно бокситового материала и дальнейшего его преобразования (Пастухова, 1985). В.Т. Фролов классифицировал бокситы по структурным особенностям, минеральный состав при этом имел второстепенное значение. Были выделены две главные структуры: пелитоморфная и зернистая. К первой относятся аморфные, коллоидально-волокнистые и микроструктурные разновидности,

к зернистым – оолитовые, бобовые, желваковые, обломочные от щебнисто-галечных до песчаных (Фролов, 1993).

Для классификации бокситов используют генетические, литологические особенности, химический и минеральный состав, технологические свойства (Bardossy, Aleva, 1990; Lapparent, 1930; Madencilik, 2001; Горецкий, 1960; Богатырев, 1999; Михайлов, 1973). Однако очень редко проводится корреляция этих свойств с текстурно-структурными особенностями бокситов. Г. Бардоши классифицировал бокситы по условиям образования и строению залежей. Латеритные бокситы были непосредственно связаны текстурными особенностями и составом с подстилающими их материнскими породами (Bardossy, Aleva, 1990; Gow, Lozej 1993; Horbe, Costa, 1999; Mutakyahwa et al., 2003; Liu, 2010). По строению залежей также выделяются месторождения средиземноморского, казахстанского, тихвинского, арьежского и других типов (Bardossy, Aleva, 1990). Впоследствии эта классификация была расширена (Савко, Овчинникова, 2022).

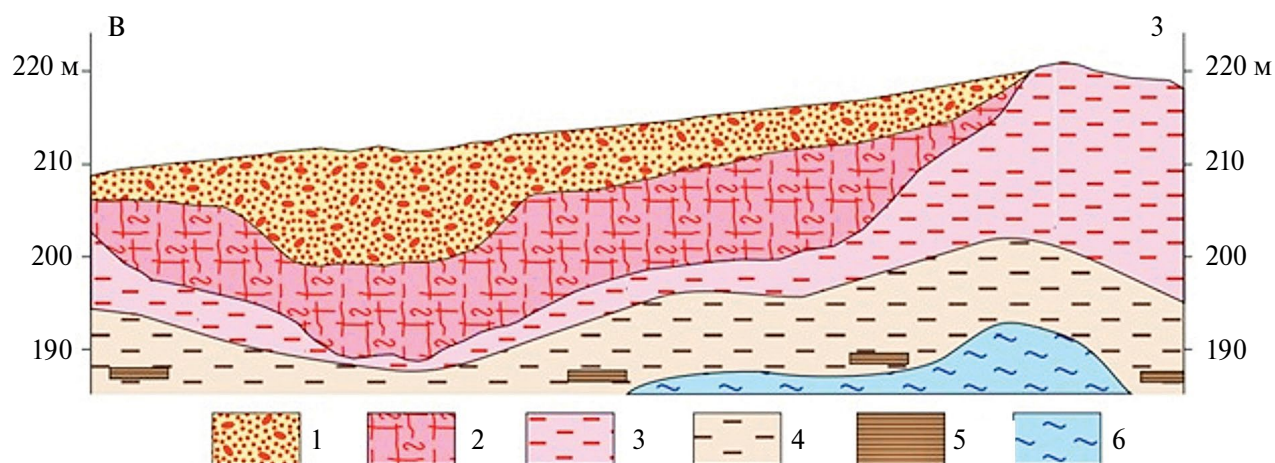
Литолого-генетические типы бокситов провинции Фута Джаллон-Мандинго (ФДМ) были выделены по совокупности геологических признаков, минерального и химического состава, полученных в результате бурения и разведки, которые велись с 1998 г. (Мамедов и др., 2020<sub>1</sub>). Разнообразный состав материнских пород, по которым образовались бокситы, и наличие вторичных переотложенных бокситов усложняли эту задачу. Однако, акцентируя внимание на текстурно-структурных особенностях бокситов, нам все же удалось найти и обобщить закономерности, позволяющие

объединить их в различные группы. Изучение текстурно-структурных особенностей бокситов – это единственный путь, благодаря которому можно составить представление об условиях их образования (Сиротин, 1973). Именно в текстурах и структурах руд запечатлена их генетическая история.

На сравнительно небольшой площади ФДМ сосредоточены огромные запасы бокситов различных литолого-генетических типов, образование которых связано с многостадийностью, запечатленной в текстурах и структурах руд.

В данном исследовании ставились две задачи: во-первых, уже на стадии поисковых работ при ведении полевой документации по текстурно-структурным особенностям определить возможность принадлежности бокситов к различным литолого-генетическим типам и, во-вторых, оценить соответствие генетических классов в целом их геолого-экономической перспективе.

За основу была взята генетическая классификация бокситов, предложенная В.И. Мамедовым (Мамедов и др., 2020<sub>1</sub>). В ней по генетическому признаку было выделено 3 типа бокситов: классические латеритные, сформировавшиеся по коренным породам, осадочно-латеритные, образование которых произошло по осадочным рыхлым породам серии Сангареди, и инфильтрационно-метасоматические, химически измененные бокситы и сопутствующие породы, образовавшиеся под отложениями серии Сангареди благодаря интенсивному перераспределению вещества в профиле выветривания (фиг. 1). Эта классификация была расширена и дополнена, в ней удалось обобщить все разновидности бокситов, встречающиеся в провинции ФДМ. Нами они были разделены



**Фиг. 1.** Схематическое расположение генетических типов бокситов в бокситоносном профиле коры выветривания: 1 – осадочно-латеритные, 2 – инфильтрационно-метасоматические, 3 – латеритные (*in situ*), 4 – железистые латериты, 5 – ферриплантиты, 6 – материнские породы.

по литологическим особенностям материнского субстрата, в том числе переотложенного. За основу принимался не минеральный состав, а именно текстурно-структурные особенности материнских пород, так как именно эти характеристики отражены в современном профиле коры выветривания.

### ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Были изучены бокситы из разных зон профиля коры выветривания провинции ФДМ. Использовались образцы из коллекции В.И. Мамедова, переданной в ИГЕМ РАН, а также из музея в городе Сангареди на базе компании Ltd Geoprospect. Столь обширный материал позволяет при всем многообразии литологических типов бокситов и сопутствующих им пород латеритных покровов выявить как их общие черты, так и различия.

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О БОКСИТОНОСНЫХ ЛАТЕРИТНЫХ ПОКРОВАХ ПРОВИНЦИИ ФУТА ДЖАЛЛОН-МАНДИНГО

Территория Фута Джаллон-Мандинго, приуроченная к одноименной морфоструктуре и к единой геотектонической структуре – платформенному чехлу Сахарской плиты, в пределах переменного-влажного тропического климата Западной Африки, является крупнейшей в мире бокситоносной провинцией. Она находится на территории Республики Гвинея, восточная часть захватывает республику Мали, а северная – небольшой участок территории Гвинеи-Биссау.

Практически вся территория провинции приурочена к площади развития субгоризонтально залегающих терригенно-осадочных отложений платформенного чехла. Эти породы почти повсеместно интродуцированы силлами и дайками основных пород мезозойской трапповой формации. Среди отложений платформенного чехла распространены существенно глинистые породы – аргиллиты, алевро-аргиллиты, мелкозернистые кварцево-глинистые алевролиты и алевро-песчаники. Силлы и дайки состоят из долеритов, конга-диабазов и габбро-долеритов.

Главными факторами, определяющими возможность образования и особенности внутреннего строения и состава бокситов в латеритных корах выветривания этой провинции, являются: наличие алюмосиликатного субстрата, положительные пологие формы рельефа в пределах месторождений, климат и длительность благоприятного для бокситообразования временного периода (Мамедов и др., 2020<sub>1</sub>).

Наряду с активным химическим выветриванием имело место переотложение обломочного материала с формированием континентальных образований водноосадочных и суходольных фаций, которые подвергались повторному латеритному выветриванию. Отложения среднего миоцена, выделенные в серию Сангареди, сформировали обширные аллювиально-озерные равнины (Mamedov et al., 2021, Мамедов и др. 2020<sub>1</sub>).

Особенностью континентальных образований на фоне интенсивного химического выветривания является то, что крупнообломочный материал представлен, в основном, каменистыми породами латеритных покровов. Коренные алюмосиликатные породы настолько быстро химически выветриваются, что практически не дают накоплений гравийно-галечной размерности, а дезинтегрируются до песка и глин. В аллювии современных рек валунно-галечные накопления образуются, в основном, на небольшом расстоянии ниже порогов.

В пределах данной провинции влажный, переменный-влажный и тропический климат и, соответственно, активное химическое выветривание преобладали как минимум с конца мела до настоящего времени.

### ЛИТОЛОГО-ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ БОКСИТОВ И СОПУТСТВУЮЩИХ ПОРОД, РАЗВИТЫХ В ПРОВИНЦИИ ФДМ

Латеритные коры выветривания в провинции развиты практически повсеместно, покрывают сплошным чехлом плоский и пологоволнистый рельеф водораздельных пространств и останцовых возвышенностей и их отрогов и пологих склонов. Коры выветривания отсутствуют только на крутых участках склонов и современных днищах долин, включая пойму и первую надпойменную террасу.

В обобщенном виде вертикальный профиль коры выветривания сложен двумя различными литологическими горизонтами (Макарова и др., 2023). Нижний, глинистый горизонт состоит из полиминеральных псевдоморфных глин, в которых снизу вверх постепенно исчезают фрагменты слабо выветрелых материнских пород. В верхней части горизонта отмечаются преимущественно светло-серые каолиновые глины, которые еще выше становятся пестроцветными, а затем преимущественно красноцветными за счет увеличения содержания гидроксидов железа.

Верхний горизонт – собственно латеритный покров – сложен преимущественно минералами гидроксидов и оксидов железа и алюминия.

Латеритный покров является бокситовмещающей толщей коры выветривания.

В бокситоносных латеритных покровах наблюдается вертикальная зональность. В нижней части на границе с литомаржем практически повсеместно развиты железистые латериты переходной зоны, так называемый бокситовый “пряник”, представляющий собой охристо-серую или красноцветную пористую породу (Мамедов и др. 2020<sub>2</sub>). По своему составу этот “пряник” имеет повышенное содержание кремнезёма и железа и низкое содержание глинозёма (<40%) (Шипилова и др., 2022).

Бокситы обычно занимают среднюю часть разреза латеритного покрова, если сверху залегает верхний железистый горизонт – кираса (до 2 м), либо слагают всю верхнюю подпочвенную часть выше переходной зоны. Породы кирасы, сформированные по алевро-аргиллитам, имеют брекчиевидную и конгломерат-брекчиевую текстуры, а по долеритам – шлаковидную и концентрически-зональную полосчатую текстуру.

Для разрезов классического латеритного типа, сформировавшихся по коренным терригенно-осадочным отложениям платформенного чехла, интродуцированным силлами и дайками основных пород, характерна прямая зональность. В этих разрезах в верхней части латеритного покрова бокситы становятся более железистыми либо сменяются железистыми латеритами – кирасой.

Отмечаются разрезы, в которых бокситы более высокого качества залегают в самом верху (прямо под почвой) и вниз по разрезу их качество (содержание  $Al_2O_3$ ) падает. Это обратная зональность, обнаруженная в латеритных покровах, где бокситы образовались по переотложенным породам серии Сангареди, либо по обеленным коренным породам в ложе среднемиоценового континентального бассейна (Мамедов и др., 2020<sub>1</sub>).

Главные отличия характера зональности, внутреннего строения и состава пород бокситоносных латеритных покровов обусловлены различиями материнского субстрата, по которому сформировались бокситы и сопутствующие им латеритные породы (Мамедов и др. 2020<sub>1</sub>).

Таблица 1. Минеральный состав бокситов

Литологические типы бокситов	Гиббсит, мас.%	Бёмит, мас.%	Гётит, мас.%	Гематит, мас.%	Анаказ, мас.%	Рутил, мас.%
Классические <i>in situ</i>	52–89	< 2	2–19	2–22	1–4	1–3
Осадочно-латеритные	43–87	2–22	2–9	2–11	1–3	1–3
Инфильтрационно-метасоматические	38–81	2–18	2–7	1–5	1–3	1–3

В провинции ФДМ установлены три генетических типа бокситов: латеритные, осадочно-латеритные и инфильтрационно-метасоматические или химически измененные.

Валовый химический состав бокситов варьирует в пределах (мас.%) (Мамедов и др., 2020<sub>1</sub>, 2021):

– классические *in situ* –  $SiO_2$  – 0.27–14.68,  $Al_2O_3$  – 40.16–54.9,  $TiO_2$  – 1.51–7.91,  $Fe_2O_3$  – 9.5–33.9,  $CaO$  – 0–0.45,  $MgO$  – 0.02–0.44,  $K_2O$  – 0–0.13,  $Na_2O$  – 0–0.3,  $P_2O_{5-0}$  – 0.3, ППП – 15–32;

– осадочно-латеритные бокситы –  $SiO_2$  – 0.18–7,  $Al_2O_3$  – 43.28–68.47,  $TiO_2$  – 1.29–17.55,  $Fe_2O_3$  – 1.64–27.25,  $CaO$  – 0.01–0.4,  $MgO$  – 0.02–0.28,  $K_2O$  – 0–0.13,  $Na_2O$  – 0–0.1,  $P_2O_{5-0}$  – 0.6, ППП – 17–32;

– инфильтрационно-метасоматические –  $SiO_2$  – 0.2–3.46,  $Al_2O_3$  – 40.08–67.97,  $TiO_2$  – 1.99–8.1,  $Fe_2O_3$  – 0.39–34.31,  $CaO$  – 0.01–0.36,  $MgO$  – 0.03–0.35,  $K_2O$  – 0–0.08,  $Na_2O$  – 0.03–0.35,  $P_2O_{5-0}$  – 0.4–0.2, ППП – 17–33.

Минеральный состав различных литологических типов бокситов приведен в табл. 1 (Мамедов и др., 2020<sub>1</sub>).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Комплексный литолого-петрографический анализ бокситов позволил установить характерные признаки для трех литологических типов, подчеркивающих многостадийность их образования.

### ЛАТЕРИТНЫЕ БОКСИТЫ

Среди латеритных бокситов провинции ФДМ выявлены залежи, образовавшиеся *in situ* в результате замещения различных пород: 1) существенно глинистых терригенно-осадочных аргиллит-алевролитовых толщ от верхнепротерозойского до девонского возраста и 2) мезозойских магматических пород трапповой формации: долеритов, конга-диабазов и габбро-долеритов.

#### *Бокситы in situ по алевро-аргиллитам*

Среди этих пород обнаружены псевдоморфные бокситы полосчатой и массивной текстуры. В большом числе месторождений наряду с блоками

и горизонтами псевдоморфных бокситов и латеритов в бокситовых залежах также присутствуют бокситы и латериты с обломочными текстурами.

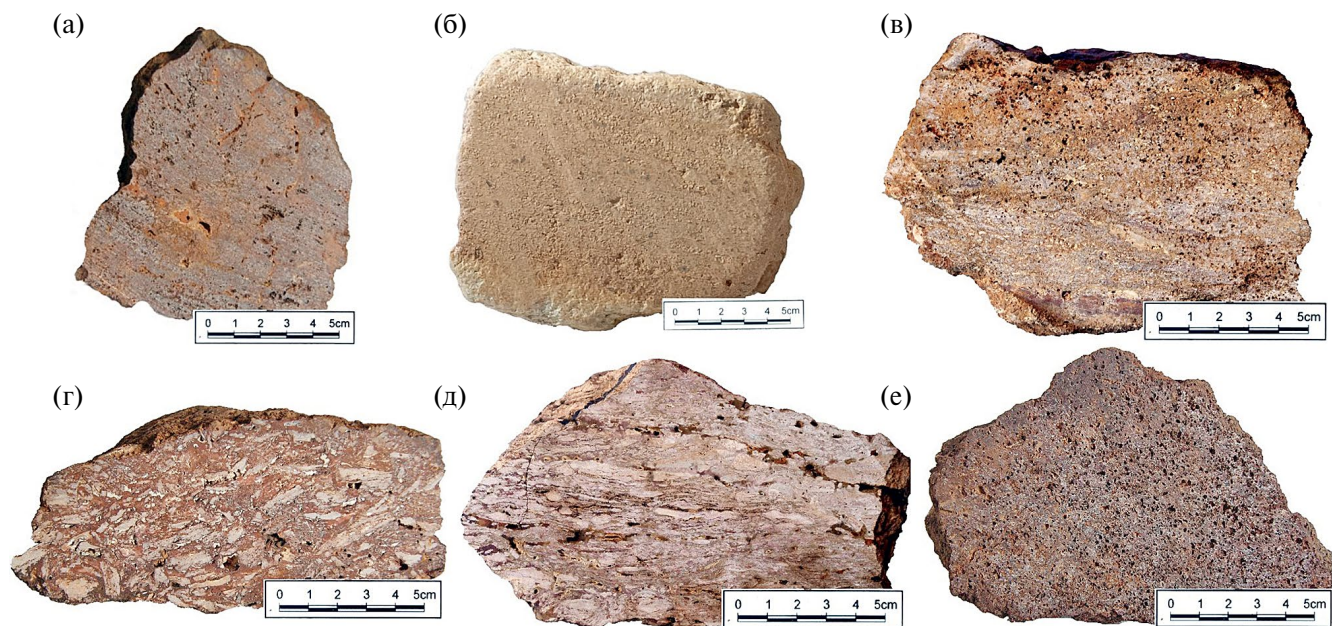
*Псевдоморфные бокситы* характеризуются тонкой полосчатостью, унаследованной от первичной слоистости алевро-аргиллитов (фиг. 2а, е). Бокситы, образованные по массивным аргиллитам, обладают менее выраженной полосчатостью при равномерной мелко-скрытокристаллической структуре. Размеры зерен минералов в обломках позволяют судить о типе замещенных исходных коренных пород. Гематит слагает удлиненные зерна, образующие равномерную, реже неравномерную вкрапленность в породе (фиг. 2д). По массивным песчаникам развиты псевдоморфные бокситы и латериты (фиг. 2б). Цвет бокситов может меняться в зависимости от содержания в них железа от почти белых (фиг. 2в) и розовых до коричнево-красных (фиг. 2г) и даже лилово-красных (за счет гематита) в разном виде с высоким содержанием железа (фиг. 2д).

Под микроскопом отчетливо прослеживается полосчатая, с редкими участками каверн, текстура и пелитовая структура, которая изменяется до алевроитовой. Местами сохраняется реликтовая алевроитовая структура, унаследованная от исходных алевролитов. Размер и морфология зерен свидетельствуют о литологическом составе замещенных исходных коренных пород. Фрагменты с кавернозной текстурой сложены в основном

микро-, тонкозернистым гиббситом, представленным изометричными выделениями.

Среди гиббситовой основной массы рассеяны тончайшие зерна гётита, составляющего 10–25% объема. Гематит слагает изометричные зерна, неравномерно распределенные в породе. Содержание гематитовых зерен составляет ~5%. Размер пор — до 0.5 мм. Их количество — ~5%. Цементирующая гелеморфная белая масса имеет массивную колломорфную текстуру и пелитоморфную до афанитовой структуру. Сложена она алюмогелем — микропористым аморфным оксидом алюминия, полупрозрачная, имеет белый, реже желтоватый цвет (фиг. 3а). В псевдоморфных бокситах содержание моногидратных минералов алюминия: бёмита и алюмогётита невысокое. Как правило, оно не превышает 2–2.5%. Соотношения минералов железа и алюминия изменяются значительно и связаны между собой обратной корреляцией. В целом псевдоморфные бокситы провинции низкого ( $Al_2O_3$  40–45%) и реже среднего (45–50%) качества (Mamedov et al., 2021).

*Обломочные бокситы in situ* по алевро-аргиллитам встречаются в трещинах верхней части профиля практически во всех литолого-генетических типах. Они состоят из обломков псевдоморфных бокситов размером до 1 см, сцементированных колломорфными натечными формами гидроксидов железа. Процессы физического выветривания и суффозионно-карстовые явления приводят к усадкам



**Фиг. 2.** Примеры бокситов *in situ*: а — по осадочным породам свиты Пита, б — по осадочным породам свиты Телимеле, в — по осадочным породам девона, г — по осадочным породам свиты Фаро, д — по осадочным породам свиты Фаро, в различной степени ороговикованные, е — по магматическим породам основного состава.

и дроблению на месте псевдоморфных бокситов с образованием брекчиевидных текстур. За счет заноса по трещинам почвенных пизолитов с поверхности и ожелезнения, часто внутри псевдоморфных бокситов обнаруживаются обломочные более железистые латериты с включениями пизолитов. Выявлены также образования типа хемобрекчий, образованные за счет выветривания и образования минералов железа по мелким трещинам кливажа, унаследованных псевдоморфными бокситами от коренных пород. В классическом латеритном бокситоносном покрове, в самой верхней части разреза под почвой, брекчиевидные бокситы и латериты отмечаются чаще и обогащены железом. Обломки представлены именно псевдоморфными бокситами *in situ*.

Под микроскопом в бокситах, развитых по кварцевому песчанику, видна основная гиббситовая масса с включением кварцевых зерен различных размеров. Зерна кварца изометричные, размером от 0.1 до 1 мм, не окатанные и угловато-окатанные, что подтверждает вывод об образовании бокситов *in situ*. Гиббсит цементирует обломки кварца. Также наблюдаются мелкие включения гётита размером до 0.05 мм и пленки гидроксидов железа на зернах кварца (фиг. 3б).

*Бокситы in situ, сформированные по мезозойским основным породам*

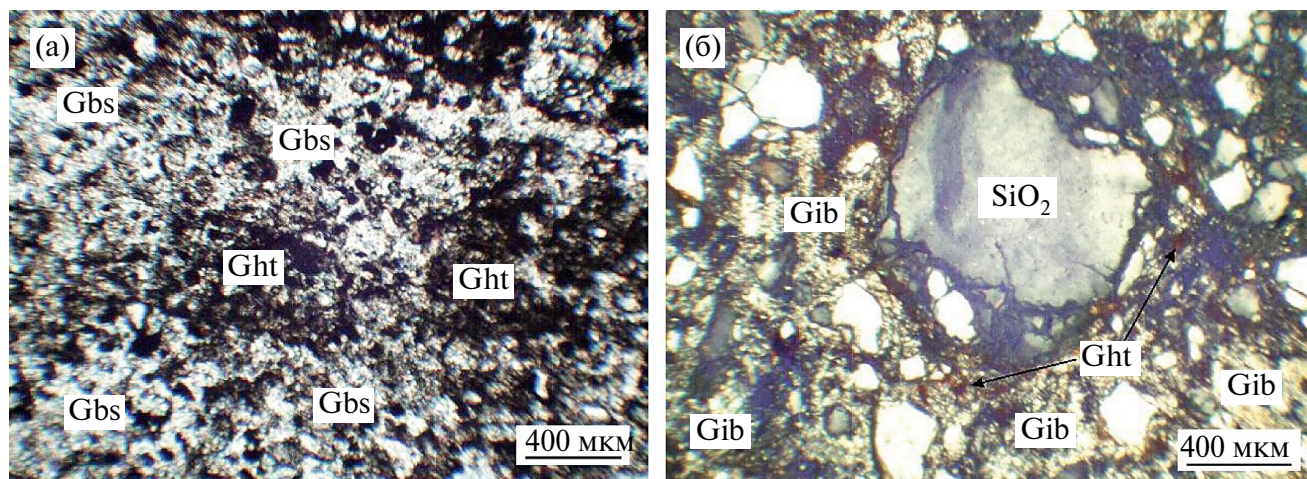
*Псевдоморфные бокситы*, образовавшиеся по долеритам (фиг. 2е), отличаются массивной текстурой со скорлуповатой отдельностью, мелкокрапчатой равномерной окраской и пористостью. Цвет бокситов меняется в зависимости от положения в разрезе и содержания железа, от бурого и лилового до желтовато-серого у высокоглиноземистых

разновидностей. Иногда встречаются участки с офитовой структурой – беспорядочно расположенными зернами гиббсита, гётита и кварца в общей однородной массе, образованной за счет гелефикации долеритовых пород.

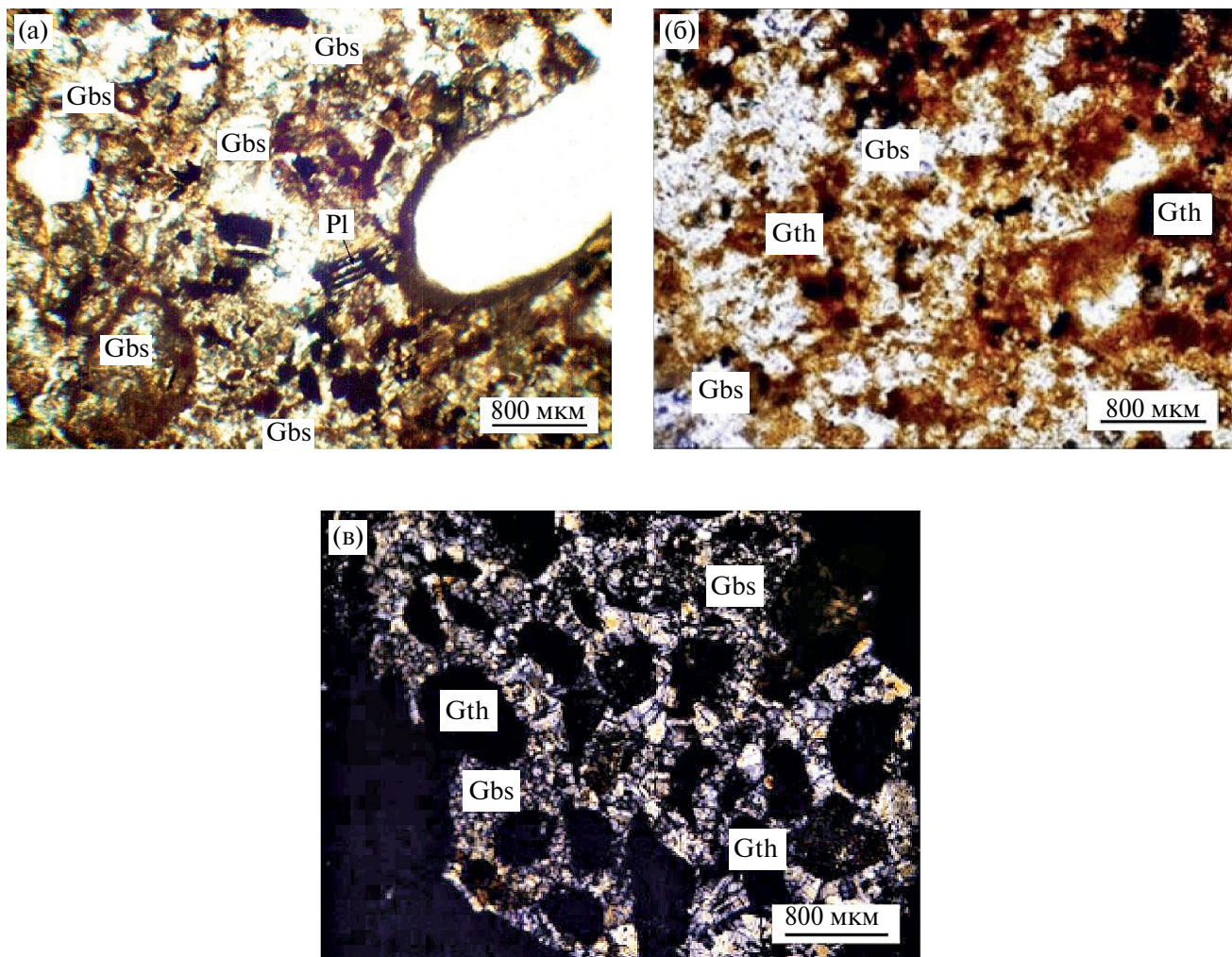
Псевдоморфные бокситы обладают массивной текстурой и микро-, мелкокристаллической структурой (фиг. 4а). Для них характерна унаследованная структура исходных долеритов. По зернам плагиоклаза развивается гиббсит. Гётит и гематит имеют удлиненные и изометричные формы. Гелефикация бокситов проявляется в развитии ступкоподобных выделений алюмогеля. Участками они раскристаллизованы в тонкозернистый гиббсит (фиг. 4б). За счет гелефикации аподолеритовых бокситов, практически непрозрачных в проходящем свете, нарушается реликтовый рисунок офитовой структуры, из-за чего он читается с трудом. В некоторых шлифах наблюдается развитие вторичного гиббсита по стенкам трещин и каверн.

*Обломочные бокситы.* В нижней части разреза, на границе с переходной зоной и псевдоморфными глинами, бокситы и латериты имеют желваковую и блоковую текстуру, связанную с суффозионно-карстовыми процессами. Гиббсит крупнокристаллический, с типичными двойниками, цементирующий остроугольные обломки агрегатов гётита (черное) в осветленном брекчиевидном боксите (фиг. 4в).

Если бокситы по долеритам не гелефицированы, т.е. не затронуты интенсивным привнесением алюминия, они слагают рудные залежи низкого (в основном содержание  $Al_2O_3$  – 40–43%) качества с низким содержанием монокристаллических фаз алюминия (Мамедов и др., 2020<sub>1</sub>).



Фиг. 3. а – боксит, образованный по алевро-аргиллиту, б – боксит, образованный по кварцевым песчаникам. Прозрачный шлиф (ник. +). Gbs – гиббсит, Ght – гётит,  $SiO_2$  – кварц.



**Фиг. 4.** Боксит по долериту: а – брекчиевидный боксит, б – аподолеритовый боксит массивной текстуры, в – боксит массивной текстуры. Прозрачный шлиф(Ник. +, Pl – плагиоклаз, Gbs – гиббсит, Gth – гётит).

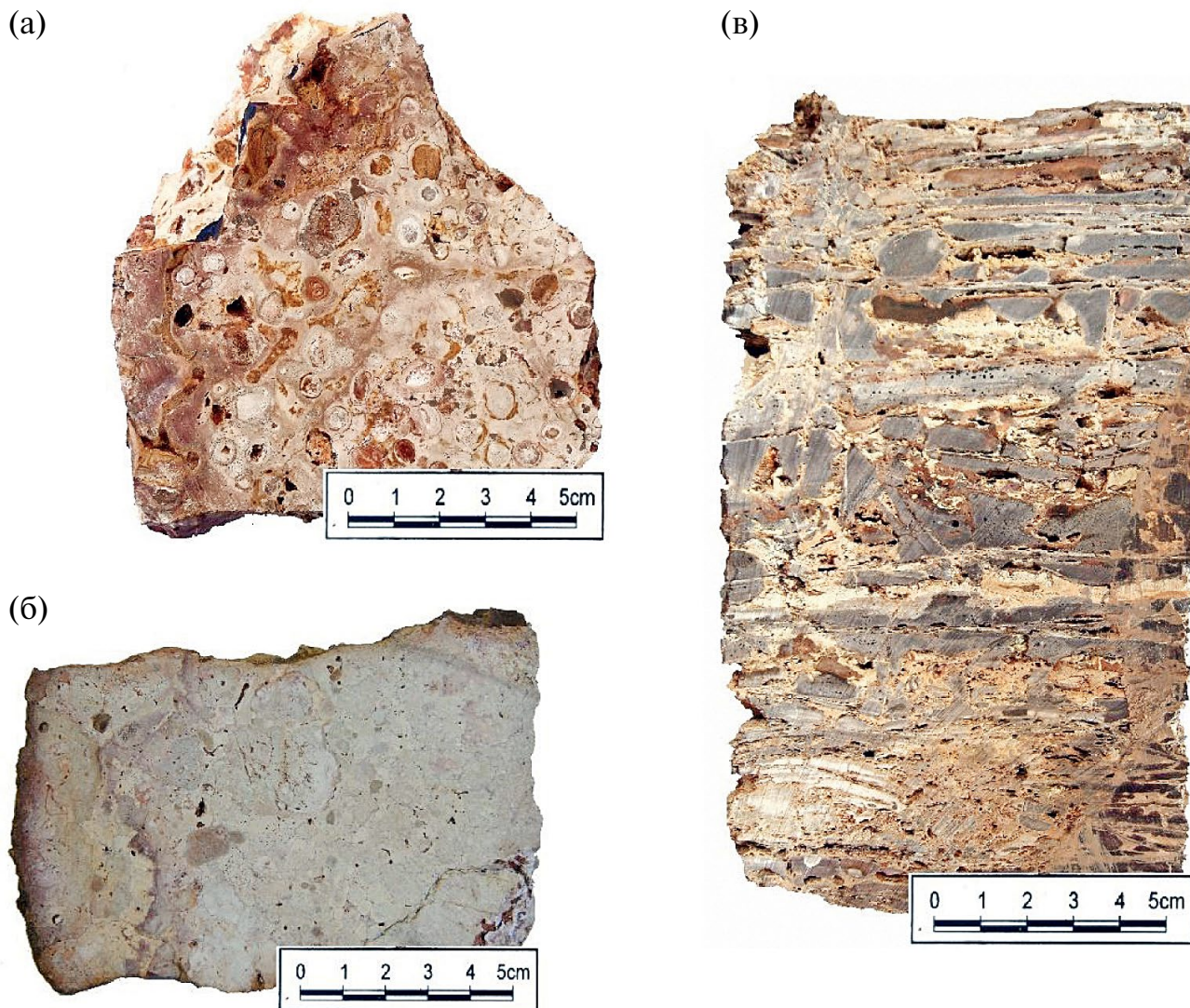
#### ИНФИЛЬТРАЦИОННО- МЕТАСОМАТИЧЕСКИЕ (ХИМИЧЕСКИ ИЗМЕНЕННЫЕ) ЛАТЕРИТНЫЕ БОКСИТЫ

Химически измененные бокситы обладают оолитовой текстурой (фиг. 5а), афанитовой и фарфоровидной структурами (фиг. 5б), а также сохраняют текстурные признаки исходной породы (фиг. 5в).

Размер оолитов в химически преобразованном боксите по алевро-аргиллитам варьирует от 0.1 до 0.4 мм. Цементирующая масса состоит в основном из микро-, тонкокристаллического гиббсита. Оолиты сложены гётитом и гематитом. Среди основной массы гиббсита также рассеяны тончайшие зерна гётита, который придает породе палево-желтый цвет. В микро-, тонкокристаллической гиббситовой массе встречаются сгустки, колломорфные выделения афанитовой полупрозрачной белой массы, имеющей показатель преломления выше,

чем у гиббсита. Она сложена микрокристаллическим бёмитом. Размер сгусткоподобных гелеморфных выделений обычно не превышает нескольких миллиметров. Ферри- и гематогель развиваются по гётит-гиббситовому субстрату, замещая его.

Цементирующая фрагменты масса имеет массивную текстуру и разделяется на два типа. Первый тип представлен гелеморфной белой полупрозрачной массой афанитовой структуры, сложенной алюмогелем, имеет белый, реже желтоватый цвет. Второй тип сложен колломорфной железистой кавернозной массой. Цементирующая масса представляет собой дисперсное, сгустковидное, колломорфно-афанитовое, реже пизолитовое вещество глинозем-железистого состава (фиг. 6а). В химически-преобразованных бокситах наблюдается значительное количество моногидрата алюминия. Оолиты, размером менее 1 мм, сложены, главным образом, бёмитом. В более крупных оолитах



**Фиг. 5.** Химически преобразованные бокситы *in situ*: а – боксит белый гелеморфный фарфоровидный с оолитами, б – гелеморфный афанитовый боксит, не сохранивший признаки исходной породы, в – боксит по алевро-аргиллиту, сохранивший структурные признаки исходных пород.

заметно тонкое чередование бёмитовых и гиббситовых колец. Цемент – гиббситовый, крупнокристаллический (фиг. 6б).

Химически-измененные белые, кремовые и сероватые гелеморфные бокситы, повсеместно залегают под осадочно-латеритными бокситами серии Сангареди. Длительная по времени восстановительная глеевая обстановка в аллювиально-озерных осадках серии Сангареди обусловила массовый вынос железа. Этот процесс не мог не затронуть и подстилающие породы ложа, особенно в выступах микрорельефа подошвы. Аналогичные обеления каолиновых глин наблюдаются под современными пойменными отложениями в долинах многих рек региона, в отличие от разрезов кор выветривания на положительных формах

рельефа, где каолиновые глины в своей верхней части всегда более железистые, пестроцветные или даже красноцветные. Латеритизация подстилающих пород проходила совместно с вышележащими обеленными осадками серии Сангареди, что привело к формированию высококачественных маложелезистых бокситов. Проведенный подсчет баланса вещества на изоволюметрической основе в гелеморфных бокситах по отношению к коренным породам показывает, что при образовании этих бокситов произошел колоссальный привнос алюминия (Мамедов и др., 2020<sub>1</sub>). Привнос алюминия происходил, безусловно, из верхней части разреза, из подвергшихся латеритизации осадочно-латеритных бокситов. В классических латеритных бокситах тоже происходит перераспределение



вещества с накоплением алюминия в нижней части бокситового горизонта (Mamedov, 2005). Однако коэффициент концентрации алюминия обычно не превышает двукратного накопления, тогда как при образовании химически-преобразованных бокситов он более трех. Количество привнесенного алюминия в 2 раза больше, чем было в каждом кубическом метре материнского коренного субстрата. Кроме того, в этих бокситах очень низкое, не свойственное латеритным бокситам содержание железа. В отличие от классических латеритных бокситов, в гелеморфных бокситах повышенное содержание моногидратных форм алюминия наблюдается в оолитовых бокситах (Mamedov et al., 2021).

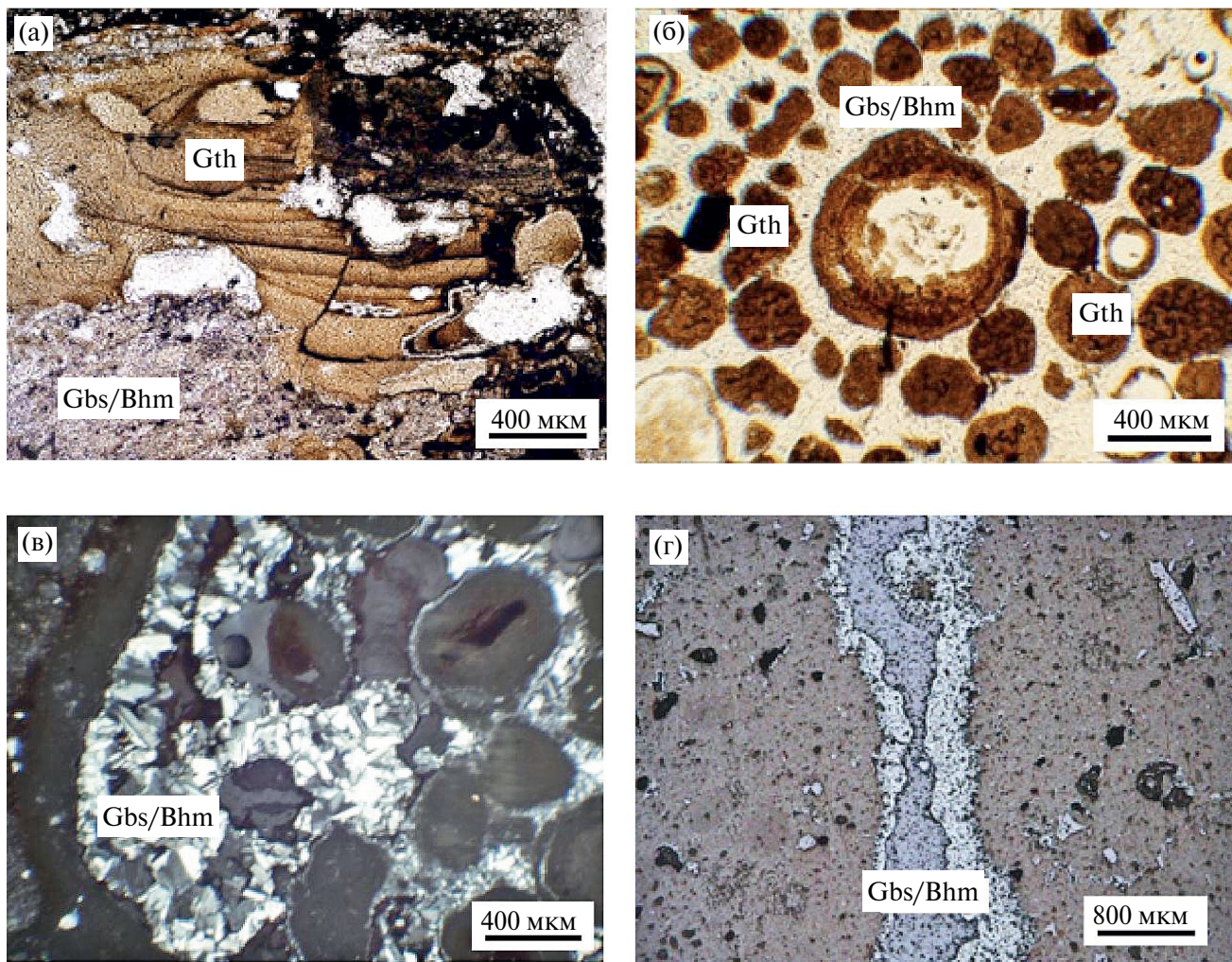
Бокситы данного литолого-генетического типа, с максимальной степенью концентрации алюминия, относятся к инфильтрационно-метасоматическому классу с химическим преобразованием

материнского субстрата. Их качество, как правило, очень высокое, близкое к осадочно-латеритным бокситам. Они фиксируют положение коренного ложа среднемиоценовых континентальных отложений (Мамедов и др., 2020<sub>1</sub>).

### ОСАДОЧНО-ЛАТЕРИТНЫЕ БОКСИТЫ

В соответствии с различными фациями осадков в провинции выделяются конгломерат-бокситы, гравелит-бокситы и песчаниковидные бокситы (фиг. 7).

*Конгломерат-бокситы* сложены галькой, как правило, размером от 2 до 7 см (фиг. 7а). Реже в основании разреза встречаются валуны (больше 10 см) и полуокатанные глыбы. Цементирующая часть породы представлена песчаниковидными бокситами с включениями гравийных зерен, сцементированных гелеморфным глинозёмистым веществом и микрокристаллическим гиббситом.



**Фиг. 6.** Химически преобразованный гелеморфный боксит: а – афанитовая структура; б – оолитовая структура, в – крупные гиббситовые кристаллы, г – вторичная гелефикация по трещине. Прозрачный шлиф (Ник. +, Gbs – гиббсит, SiO<sub>2</sub> – кварц, Bhm – бёмит, Gth – гётит, Нем – гематит)



Фиг. 7. Осадочно-латеритные бокситы: а – боксит конгломератовый по отложениям серии Сангареди, б – гравелит-боксит по отложениям серии Сангареди, в – боксит песчаниковидный по отложениям серии Сангареди.

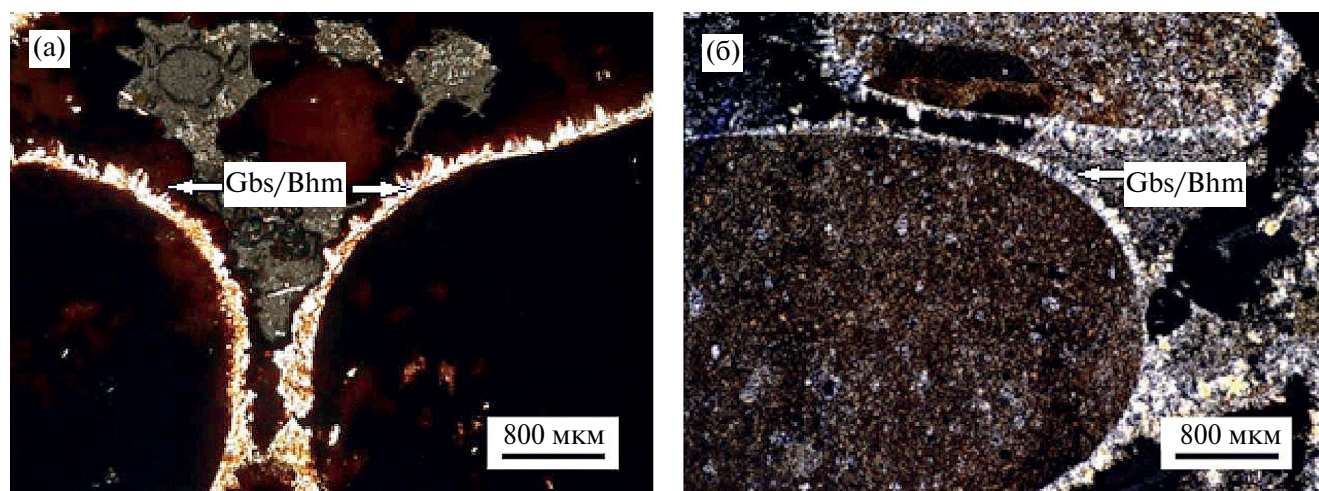
В составе обломков преобладают светлые серые, кремевые и неясно пятнистые афанитовые, микрокристаллические высокоглинозёмистые бокситы, а также оолитовые бокситы. Вокруг железистых бобовин наблюдаются оторочки гиббсита (фиг. 8а). Встречаются округлые обломки апоалевролитового боксита, окаймленные оторочкой крупнокристаллического гиббсита (светло-серый) с удлиненными таблитчатыми ориентированными перпендикулярно к поверхности обломков сростками кристаллов. Черные выделения – замещенный гётитом магнетит (фиг. 8б). Оолитовые бокситы зачастую образуют в конгломератовых бокситах неправильные по форме тела, выполняя полости и крупные трещины. Обломки и цемент имеют светлую окраску и маложелезистый высокоглинозёмистый состав.

Конгломерат-бокситы, залегающие в основании разреза бокситизированных пород серии Сангареди, по сравнению с гравелитовыми и песчаниковидными, обогащены бёмитом (Mamedov et al., 2021).

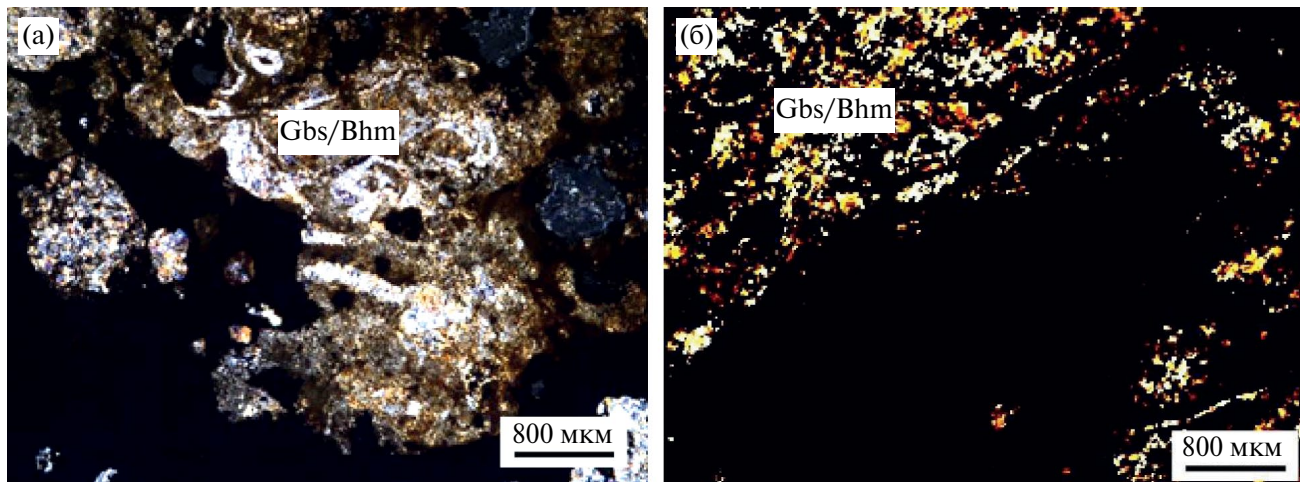
*Гравелит-бокситы* отличаются от конгломерат-бокситов в основном размером обломков

и меньшим содержанием бёмита (фиг. 7б). Среди обломков гравийной размерности встречаются как округлые изометричные, так и с уплощенной формой. Встречаются псаммитовые, бобово-обломочные бокситы, с пятнами ожелезнения. Обломки сложены тонкозернистыми кристаллами гиббсита светло-серого цвета. Более крупные кристаллы гиббсита наблюдаются в трещинках и кавернах (фиг. 9а). Изометричные обломки сложены светлыми серыми афанитовыми и микрокристаллическими бокситами (фиг. 9а). В уплощенных обломках иногда наблюдается неясная тонкая полосчатость, характерная для бокситов по алевро-аргиллитам и их ороговикованным разновидностям. Цементом является песчаниковидный бокситовый материал (фиг. 9б).

*Песчаниковидные бокситы* по текстурным и структурным признакам в основном аналогичны цементирующей части конгломерат- и гравелит-бокситов (фиг. 7в). Эти массивные пористые породы светлого розовато-кремевоего цвета, с высоким содержанием глинозёма (>54–55%). При этом содержание в них бёмита заметно ниже, чем в конгломерат-бокситах (Mamedov et al., 2021).



Фиг. 8. Конгломерат-бокситы: а – железистые бобовины с гиббситовыми оторочками, б – округлые обломки апоалевролитового боксита. Прозрачный шлиф (Ник. +, Gbs – гиббсит, Bhm – бёмит).



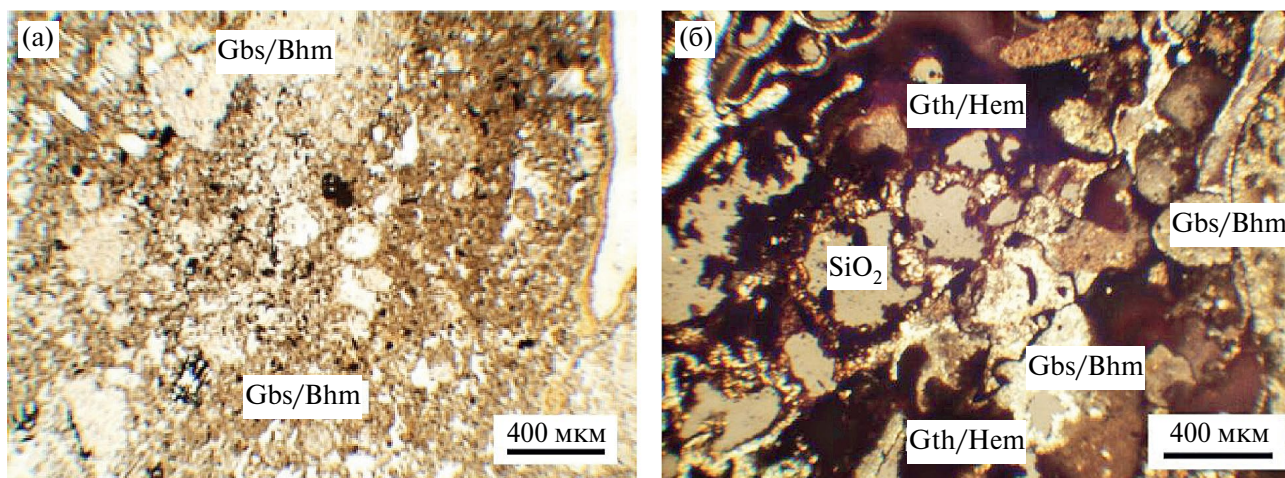
Фиг. 9. Гравелит-бокситы: а – псаммитовый, бобово-обломочный боксит, б – боксит по алевро-аргиллитам. Прозрачный шлиф (Ник. +, Gbs – гиббсит, Gth – гётит, Hem – гематит, Bhm – бёмит).

В шлифах видно, что обломки размеров песчаной и мелкогравелитовой фаций сцементированы гелеморфным веществом и микрокристаллическим гиббситом (фиг. 10а).

Основная масса боксита колломорфной текстуры состоит из сильно корродированных зерен кварца в гиббсит-бёмитовых агрегатах афанитовой структуры. Наблюдаются включения гётита и гематита. Зерна кварца размером от 0.1 до 0.6 мм имеют изометричную, окатанную форму, что говорит о перемещении компонентов. По краям они корродированы и окаймлены железосодержащими пленками. В результате выщелачивания кварца образуются пустоты, на месте которых кристаллизуется гиббсит. Гематит и гётит, в основном, образуют пленки, которые занимают ~15% шлифа. Встречаются также редкие выделения зерен гематита и гётита размером до 0.1 мм (фиг. 10б).

Своеобразие переотложенных континентальных отложений в условиях интенсивного химического выветривания заключается в том, что в составе обломочного материала преобладают каменистые продукты латеритных кор выветривания (железистые латериты и бокситы). В песчано-глинистых фракциях, наоборот, преобладают каолинит с кварцем, если в зоне мобилизации присутствовал крупно-среднезернистый кварц.

Наряду с коренными породами в провинции в разное время образовались различные типы континентальных отложений. В фациальном профиле их можно проследить от элювия на бовалях, через делювиальные шлейфы склонов и скопления коллювия, делювиально-пролювиальных выносов у основания склонов, до аллювия в днищах современных долин. В настоящее время на фоне подъема территории преобладают процессы эрозии



Фиг. 10. Песчаниковидный боксит: обломки песчаной и мелкогравелитовой размерности (а); зерна кварца в гиббсит-бёмитовой минеральной массе (б). Прозрачный шлиф (Ник. +, Gbs – гиббсит, Gth – гётит, SiO<sub>2</sub> – кварц, Hem – гематит, Bhm – бёмит)

и аллювиальные отложения развиты фрагментарно. В большинстве районов в руслах обнажаются коренные породы (Mamedov et al., 2021).

Особое значение для формирования месторождений бокситов рассматриваемой провинции имело среднемиоценовое время, когда с подъемом базиса эрозии произошло накопление мощной (не менее 130–150 м по осям главных дренажных систем) толщи водноосадочных континентальных отложений серии Сангареди. Нижние ступени предсреднемиоценового рельефа были погребены под этими отложениями. Таким образом, образовались обширные аллювиально-озёрные аккумулятивные поверхности. Над ними возвышались останцы более древнего рельефа из которого поступал обломочный материал.

Смена валунно-галечных отложений в основании толщи, через песчано-гравийные, песчано-глинистыми в верхней части, свидетельствует о трансгрессивном характере осадконакопления (Мамедов и др., 1985). В отличие от более молодых континентальных образований, отложения серии Сангареди занимали к концу среднего миоцена значительно более обширные площади (Мамедов и др., 2020<sub>1</sub>). Вполне очевидно, что начавшееся в позднем миоцене опускание базиса эрозии и расчленение аллювиально-озерной равнины сопровождалось выводом из зоны обводнения в зону латеритизации (выше уровня грунтовых вод) отложений серий Сангареди. К настоящему времени

первичные осадки серии Сангареди не сохранились. Их латеритизация привела к образованию бокситов. Главными признаками того, что латеритное выветривание претерпели именно ранее латеритизованные и переотложенные породы, являются:

1. Высокая степень очистки от кремнезема, содержание которого в каолините и кварце было достаточно высоким, особенно в песчано-глинистых осадках.

2. Бокситы занимают строго определенное положение в разрезе коры выветривания. Под этими бокситами, так же как в классическом латеритном профиле, наблюдается железистый горизонт, а ниже – псевдоморфные каолиновые глины.

3. На участках, ниже по склонам, где отложения серии Сангареди срезаны, по коренным породам повсеместно наблюдаются полные профили латеритной коры выветривания с бокситами. Это говорит о том, что уже после денудации отложений серии Сангареди, времени и благоприятных условий было достаточно для латеритного бокситообразования (Мамедов и др., 2020<sub>1</sub>).

Таким образом, изучение текстурно-структурных особенностей различных литологических типов бокситов позволило установить, что существуют как конвергентные, так и индикаторные признаки, которые можно использовать при диагностике высоколиквидных руд. Полученные данные сведены в табл. 2.

Таблица 2. Текстуры и структуры бокситов

Литологический тип	Унаследованные текстуры и структуры от материнских пород	Текстуры и структуры химического преобразования латеритов	Текстуры переотложенных бокситов
Классические <i>in situ</i>	Псевдоморфные бокситы алевро-пелитовой, полосчатой, массивной и кавернозной текстуры. Структура пелитоморфная, афанитовая, офитовая, микро- и мелкокристаллическая	Псевдоморфные брекчиевидные бокситы обломочной колломорфной, желваковой и блоковой текстуры	
Инфильтрационно-метасоматические	Псевдоморфные бокситы полосчатой и массивной текстуры, афанитовой структуры	Гелеморфные бокситы колломорфной, кавернозно-трещиноватой, оолитовой текстуры, афанитовой, фарфоровидной, пизолитовой структуры	
Осадочно-латеритные			Конгломератовые, гравелитовые и песчанниковидные, бокситы с обломочной, колломорфной, оолитовой текстурой, микрокристаллической, афанитовой, псамитовой структурой

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

История геологического развития рассматриваемой территории, накопление мощной толщи континентальных водноосадочных отложений, существенные эпигенетические преобразования в глеевой геохимической обстановке как самих отложений, так и подстилающих их коренных пород, на фоне длительной эпохи латеритного выветривания, привели к формированию специфических бокситов, отличающихся уникальным качеством и большими мощностями рудных тел. Процессы мобилизации и перераспределения вещества в мощной толще рыхлых отложений, почти лишенной железа, при их латеритизации приводили к интенсивному накоплению алюминия как в самой толще, так и в обеленных подстилающих породах.

На фоне формирования классических латеритных бокситов рассматриваемой провинции, благодаря сложному двух-трехстадийному генезису, сформировались отличные по внешним признакам, цвету, текстуре, структуре, литолого-генетические типы бокситов.

Для латеритных бокситов *in situ* установлены следующие характерные особенности:

1. Псевдоморфные текстуры и структуры, унаследованные от материнских пород.
2. Присутствие пород обломочного, брекчиевидного строения, образовавшихся за счет процессов усадки, смены температурного режима, влияния корневой системы, трещин тектонического или гравитационного происхождения, внутрикоровых явлений суффозионно-карстового типа и т.п., которые активизируются на фоне интенсивного химического выветривания.
3. При этом обломки псевдоморфных бокситов образовались на месте и не были существенно перемещены. Это подтверждается угловатыми, не окатанными формами обломков.

Для инфильтрационно-метасоматических, химически преобразованных латеритных бокситов *in situ* установлены следующие характерные особенности:

1. Псевдоморфные текстуры и структуры, унаследованные от материнских пород.
2. Развитие по трещинам и пустотам большого количества гелеморфной белой полупрозрачной массы с колломорфной текстурой и афанитовой структурой, сложенной алюмогелем.
3. Латеритизация подстилающих пород проходила совместно с вышележащими обеленными отложениями серии Сангареди. Привнос алюминия происходил из верхней части разреза, из

подвергшихся латеритизации осадочно-латеритных бокситов.

Для осадочно-латеритных бокситов установлены следующие характерные особенности:

1. Окатанные валунно-галечные отложения в основании толщи, через песчано-гравийные, песчано-глинистые в верхней части бокситы по отложениям серии Сангареди.
2. Латеритизация перемещенных осадков.

Предлагаемая генетическая типизация бокситов, основанная на текстурно-структурных особенностях пород, фактически является основой для геолого-промышленной классификации месторождений региона. Анализ показывает, что месторождения, в пределах которых преобладают залежи осадочно-латеритных и химически-преобразованных бокситов, отличаются не только большими мощностями рудных тел и значительно более высоким содержанием общего глинозёма в рудах, но и повышенными содержаниями моногидратных форм. Это определяет и различные экономические показатели эксплуатации и технологий металлургического передела бокситов.

Уже на стадии поисково-оценочных и разведочных работ применение предлагаемой типизации позволит прогнозировать промышленную ценность бокситовых залежей и месторождений в целом.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания ИГЕМ РАН “Кристаллохимические особенности, химический состав минералов и их ассоциаций как генетические индикаторы эндогенных и экзогенных процессов” № 124022400142–2, аналитические исследования проведены в ЦКП “ИГЕМ АНАЛИТИКА”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Богатырев Б.А. Месторождения бокситов подвижных поясов земной коры: Условия образования и закономерности размещения: дис. ... д-ра геол.-мин. наук: 04.00.11. М., 1999. С. 84.
- Горецкий Ю. К. Закономерности размещения и условия образования основных типов бокситовых месторождений // Труды Всесоюзного научно-исследовательского института минерального сырья. (Новая серия). М.: М-во геологии и охраны недр СССР; вып. 5. Москва: [б. и.]. 1960. 257 с.
- Макарова М.А., Мамедов В.И., Боева Н.М., Шипилова Е.С., Внучков Д.А., Бортников Н.С. Крупнейшая в мире бокситоносная провинция Фута Джаллон-Мандинго

- (Западная Африка). Часть 4: механизм образования зональности в латеритных корках выветривания // Геология руд. месторождений. 2023. Т. 65. № 3. С. 237–253. <https://doi.org/10.31857/S0016777023030036>
- Мамедов В.И., Ануфриев А.А., Сума Н.М.Л.* Особенности бокситорудной залежи Сангареди (Гвинея) // Геология и разведка. 1985. № 4. С. 38–47.
- Мамедов В.И., Макарова М.А., Боева Н.М., Служин А.Д., Шипилова Е.С., Бортников Н.С.* Главные процессы и стадии формирования уникального месторождения бокситов Сангареди (Западная Африка) // ДАН. 2020. Т. 492. № 1. С. 5–11.
- Мамедов В.И., Шипилова Е.С., Боева Н.М., Служин А.Д., Макарова М.А., Внучков Д.А., Бортников Н.С.* Ферриплантиты в бокситоносной латеритной коре выветривания провинции Фута Джаллон-Мандинго, Африка: причины накопления железа // ДАН. Науки о Земле. 2020. Т. 490. № 1. С. 12–16.
- Михайлов Б.М., Абрамов В.П., Басс В.П., Бгатов В.И., Большун Г.А., Венков Д.А., Долгополов В.Ф., Кирпаль Г.Р., Киселёв Л.И., Коннов Л.П., Кофман В.С., Одокий Б.Н., Сухарина А.Н., Тюрин Б.А., Шацкий С.Б., Федоренко О.А.* Объяснительная записка к карте бокситоносности СССР 1 : 5000000. Ленинград, 1973. 59 с.
- Пастухова М.В.* Текстуры, структуры и вещественный состав руд платформенных месторождений бокситов СССР. М.: Недра, 1985. 216 с.
- Савко А.Д., Овчинникова М.Ю.* Эволюция бокситонакопления в фанерозое // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2022. № 1. С. 4–33. <https://doi.org/10.17308/geology.2022.1/9096>
- Сиротин В.И.* История минералов свободного глинозема и эволюция литолого-минералогических типов бокситов КМА // Литология и полезные ископаемые. 1973. № 6. С. 68–83.
- Фролов В.Т.* Литология. М.: МГУ, 1993. 352 с.
- Шипилова Е.С., Мамедов В.И., Боева Н.М.* Минералого-петрографические особенности нижнего горизонта железистых латеритов и ферриплантитов провинции Фута Джаллон-Мандинго (Гвинея, Западная Африка) // Геология руд. месторождений. 2022. Т. 64. № 5. С. 595–614. <https://doi.org/10.31857/S0016777022050112>
- Bardossy G., Aleva G.J.J.* Lateritic Bauxites // Development in Economic Geology. 1990. V. 27. P. 624.
- Gow N.N., Lozej G.P.* Bauxite // Geoscience Canada. 1993. V. 20(1). P. 9–16.
- Hill V.G., Robson R.J.* The Classification of Bauxites from the Bayer Plant Standpoint // Donaldson D., Raahauge B.E. (eds) Essential Readings in Light Metals. Springer, Cham. 2016. P. 30–36. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48176-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48176-0_3)
- Horbe A.M.C., Costa, M.L.* Geochemical evolution of a lateritic Sn–Zr–Th–Nb–Y–REE-bearing ore body derived from apogranite: the case of Pitinga, Amazonas – Brazil // J. Geochem. Explor. 1999. V. 66. P. 339–351.
- Liu X., Qingfei W., Jun D., Zhang Q., Sun S., Meng J.* Mineralogical and geochemical investigations of the Dajia Salento-type bauxite deposits, western Guangxi, China // J. Geochem. Explor. 2010. № 105. P. 137–152. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.04.012>
- Lapparent J.D.E.* Les Bauxites de la France Méridionale; Imprimerie Nationale: Paris, France. 1930. P. 1–187.
- Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu: Metal Madenler alt Komisyonu Boksit Çalışma Grubu Raporu (in Turkish).* 2001. P. 1–41.
- Mamedov V.I.* The separation between Al and Fe the supergene zone as the determining factor of premium bauxite formation // Status of bauxite, alumina, aluminum, downstream products and future prospects: XVI International Symposium ICSOBA-2005. Nagpur, India, 2005. P. 84–96.
- Mamedov V.I., Makarova M.A., Boeva N.M., Vnuchkov D.A., Bortnikov N.S.* The World's Largest Fouta Djallon–Mandingo Bauxite Province (West Africa): Part 2. The Effect of Parent Rock Composition on the Abundance and Quality of Bauxites. // Geology of Ore Deposits. 2021. V. 63. № 6. P. 599–624.
- Mutakyahwa M.K.D., Ikingura J.R., Mruma A.H.* Geology and geochemistry of bauxite deposits in Lushoto District, Usambara Mountains, Tanzania // J. African Earth Sci. 2003. V. 36. P. 357–369.

## GENETIC TYPICATION OF BOXITES OF THE FUTA PROVINCE OF JALLON-MANDINGO (WEST AFRICA) BY TEXTURAL AND STRUCTURAL FEATURES

D. A. Vnuchkov<sup>1</sup> \*, N. M. Boeva<sup>1</sup> \*\*, M. A. Makarova<sup>1</sup>, E. S. Shipilova<sup>1</sup>, V. I. Mamedov<sup>1</sup>,  
N. S. Bortnikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Staromonetny per., 35, Moscow, 119017 Russia*

\**e-mail: dim89060471812@mail.ru*

\*\**e-mail: boeva@igem.ru*

In the process of the formation of classical lateritic bauxites in the Futa Jallon-Mandingo province, due to a complex of two-three-stage genesis, different lithological and genetic types of bauxites were formed in external characteristics, color, texture, structure. The proposed genetic typification of bauxite, based on the textural and structural features of the rocks, in fact is the basis for the geological and industrial classification of deposits of the region. Studying the textural and structural features of bauxites is the only way through which one can get an idea of the conditions of their formation. It is in the textures and structures of ores their genetic history is imprinted. The analysis shows that the deposits, within which deposits of sedimentary-lateritic and chemically transformed bauxites predominate, are distinguished not only by greater thicknesses of ore bodies and a significantly higher content of total alumina in the ores, but also by increased contents of monohydrate forms. This also determines various economic indicators of the operation and technology of metallurgical processing of bauxite.

*Keywords:* Futa Jallon-Mandingo, bauxite, textural and structural features, genetic types of bauxite