



СТРОЕНИЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 552.45:553.311 (665.2)

## **Богатые железные руды в латеритной коре выветривания полосчатой железистой формации в горном хребте Симанду (Гвинейская Республика)**

**Болонин А. В.<sup>1</sup>, Мызников И. К.<sup>2</sup>, Нигматуллина А. М.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов, Москва, Россия

<sup>2</sup> Geoprospects Ltd, г. Сангаред, Гвинейская Республика

**Аннотация.** В Западной Африке на юго-востоке Гвинеи в районе горного хребта Симанду среди архейского гранито-гнейсового фундамента протягивается меридиональная синклиновая структура, сложенная нижнепротерозойской серией метаморфических пород. В ядрах синклиналей обнажена мощная толща полосчатой железистой формации (итабиритов) с прослоями филлитов и слюдяных сланцев. В кайнозойской латеритной коре выветривания псевдоморфно по итабиритам сформированы богатые железные руды (60–66 % Fe). На месторождениях Северный Симанду, Зогота, Пик-де-Фон богатые руды слагают плащеобразные залежи глубиной до 150–350 м. Залежи имеют вертикальную зональность: первичные магнетитовые итабириты – мартитизированные итабириты – кварц-мартитовая рыхлая руда – мартитовая и мартит-лимонитовая рыхлые руды – гётит-гематитовая рыхло-крепкая руда – делювиальная лимонитовая руда (канга и кираса). Во всех типах богатых руд преобладает гематит (60–82 мас. %), его дополняют гидроксиды железа (31–14,5 %), кварц 1–2 %, каолинит 1–3,5 %, гиббсит 1–3,5 %. Богатые железные руды образованы из итабиритов в результате окисления магнетита до мартита, почти полного выноса кремнезёма и затем дополнительного осаждения железа в форме гидроксидов. При формировании железных руд по прослоям филлитов образуются каолиновые глины и бокситы.

**Ключевые слова:** богатая железная руда, итабирит, мартит, боксит, Симанду, Зогота.

Для цитирования: Болонин А. В., Мызников И. К., Нигматуллина А. М. Богатые железные руды в латеритной коре выветривания полосчатой железистой формации в горном хребте Симанду (Гвинейская Республика). Руды и металлы. 2023. № 2. С. 44–63. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10008.

## **High-grade iron ores in the laterite weathering crust after the banded iron formation in the Simandou mountain range, Republic of Guinea**

**Bolonin A. V.<sup>1</sup>, Myznikov I. K.<sup>2</sup>, Nigmatullina A. M.<sup>3</sup>**

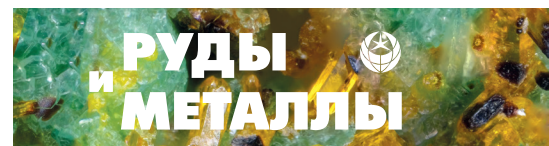
<sup>1</sup> Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Geoprospects Ltd, city of Sangarédi, Republic of Guinea

**Annotation.** In West Africa, in the southeastern Guinea, in the Simandou Range region underlain by the Archean gneiss-granite basement, a north–south synclinorium structure is extended, that is composed of the Lower Proterozoic series of metamorphic rocks. A thick sequence of the banded iron formation (itabirites) with interlayers of phyllites and mica schists is exposed in cores of the synclines. According to their composition, the itabirites are subdivided into quartz-magnetite and amphibole-quartz-magnetite varieties. High-grade iron ores (60–66% Fe) formed in a pseudomorphic manner after the itabirites in the Cenozoic lateritic weathering crust. At the North Simandou, Zogota, and Pic-de-Fon deposits, the rich ores compose mantle-shaped orebodies up to 150–350 m deep. The orebodies possess the following vertical zonality: primary magnetite itabirites – martitized itabirites – quartz-martite friable ore – martite friable ore and martite–limonite friable ore – goethite-hematite friable to solid ore – deluvial limonite ore (kanga and cuirass). All the types of the high-grade ores are dominated by hematite. The rich iron ores were formed from itabirites as a result of the oxidation of magnetite to martite, the almost complete removal of silica, and the subsequent additional supply of iron and its precipitation in the form of hydroxides. During the formation of the iron ores, kaolin clays and bauxites were formed after the phyllite interlayers.

**Keywords:** high-grade iron ore, itabirite, martite, bauxite, laterite, Simandou, Zogota.

For citation: Bolonin A. V., Myznikov I. K., Nigmatullina A. M. High-grade iron ores in the laterite weathering crust after the banded iron formation in the Simandou mountain range, Republic of Guinea. Ores and metals, 2023, № 2, pp. 44–63. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10008.



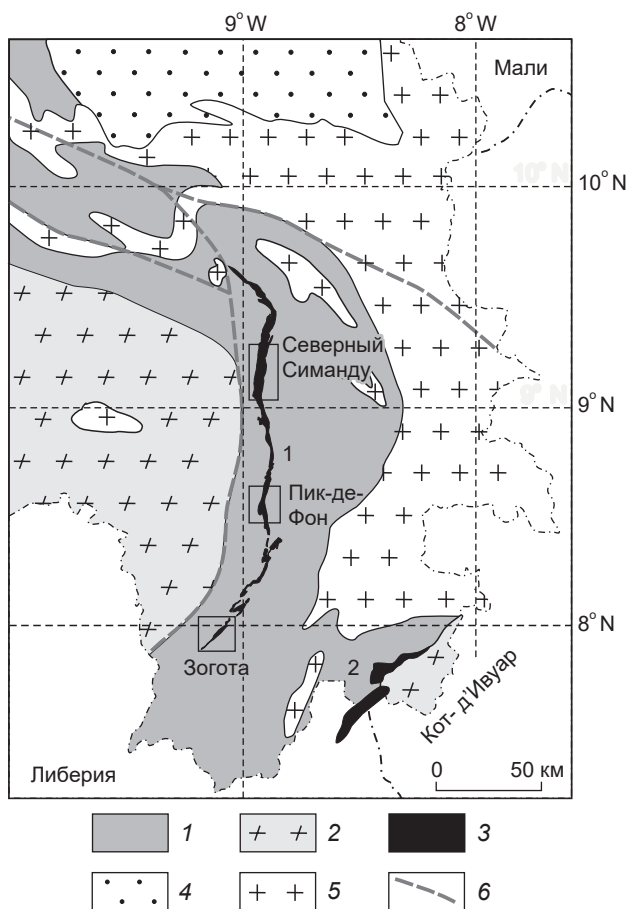
**Введение.** На юго-востоке Гвинеи в районе горного хребта Симанду и его южных отрогов в последние два десятилетия выявлены крупные запасы богатых железных руд (около 4 млрд т). Богатые руды, содержащие 60–66 % Fe, локализованы в латеритной коре выветривания по кварц-магнетитовым и амфибол-кварц-магнетитовым породам полосчатой железистой формации (BIF). Породы этой формации в русскоязычной литературе принято называть железистыми кварцитами, а в изученном районе их именуют итабиритами (от названия бразильского города Итабира в штате Минас-Жерайс с известными месторождениями BIF). Основные данные по геологическому строению, петрографии и вещественному составу рудовмещающих толщ района Симанду, включая итабириты, опубликованы нами ранее [2]. В настоящей статье описываются сформированные на основе итабиритов богатые железные руды. Они изучались в период 2008–2011 гг. при проведении компанией Geoprospects Ltd поисковых и разведочных работ на месторождениях Северный Симанду и Зогота. Работы включали маршрутное геологическое картирование, документацию и рядовое опробование керна (47 тыс. м), определение объёмной массы образцов (1975 шт.), изучение под микроскопом прозрачных (164) и полированных (189) шлифов. Специальные образцы проанализированы в лабораториях институтов г. Москвы (ИГЕМ РАН, ВИМС) рентгенофлюоресцентным (65), рентгенофазовым (153) и термическим (39) методами. Выполнен минералогический анализ рыхлых мартитовых руд (13), электронно-зондовый микроанализ минералов (21). Статистически обработаны результаты рентгенофлюоресцентного анализа керновых проб (9810), выполненного в лаборатории SGS в ЮАР.

Рудовмещающие итабириты в районе являются составной частью комплекса метаморфических пород нижнепротерозойской серии Симанду. Породы серии слагают протяжённую и узкую синклинорную структуру длиной около 210 км и шириной 0,4–7 км, которая меридиональной полосой протягивается вдоль восточной окраины архейского Леоно-Либерийского

кристаллического массива (рис. 1). В разрезе серии вычленяются две толщи: нижняя метатерригенная (метапесчаники, кварциты, слюдяные сланцы, филлиты) мощностью до 400–500 м и верхняя итабиритовая с прослоями филлитов и слюдяных сланцев общей мощностью до 220–450 м. Синклинорная структура на одних участках представлена простой одиночной синклинальной складкой с итабиритами в ядре, на других состоит из двух-трёх параллельных синклиналей с итабиритами в ядре каждой из них. В крыльях синклиналей итабириты имеют преимущественно крутопадающее залегание 45–90°.

Архейский гранито-гнейсовый фундамент в обрамлении синклинорной структуры Симанду сложен гнейсами, перемежающимися с пачками кварцитов, слюдяных и амфиболовых сланцев, телами гнейсовидных гранитов. На архейском фундаменте породы серии Симанду залегают со структурным несогласием и характеризуются более низкой степенью метаморфизма, изменяющейся от фации зелёных сланцев в северной половине структуры до эпидот-амфиболитовой на её южном окончании на месторождении Зогота. На крайнем юго-востоке Гвинеи и смежной территории Либерии в районе хребта Нимба известна другая нижнепротерозойская синклинальная структура (см. рис. 1). Она сложена метаморфической толщей, включающей (снизу вверх): конгломераты и кварциты → ортоамфиболиты → двуслюдяные, графитовые и актинолитовые сланцы, филлиты → магнетитовые итабириты [7]. В коре выветривания по итабиритам развиты богатые железные руды, которые разрабатываются карьером с 1963 г.

**Зональность железорудной коры выветривания.** Залежи богатых железных руд в синклинорной структуре Симанду слагают латеритную кору выветривания *in situ* по итабиритам. Руды отличает унаследованность в продуктах выветривания текстурных и структурных признаков материнских пород. Морфология коры выветривания в целом площадная, но с изменчивой вертикальной мощностью. На месторождении Зогота богатые руды сплошным плащом покрывают выход итабиритовой



**Рис. 1.** Геологическая схема юго-востока Гвинеи с контурами железорудных месторождений Северный Симанду, Пик-де-Фон, Зогота (с использованием данных [7]):

1 – архейский гнейсовый комплекс; 2 – позднеархейский либерийский палингенно-интрузивный комплекс (Леоне-Либерийский массив); 3 – нижнепротерозойские серии: Симанду (1) – кварциты, сланцы, итабириты; Нимба (2); 4 – нижнепротерозойский бирримский вулканогенно-терригенный протоплатформенный чехол (впадина Сигири); 5 – раннепротерозойский эбурнейский интрузивный комплекс; 6 – региональные разломы

**Fig. 1.** Geological scheme of Southeast Guinea with contours of the iron ore deposits of Northern Simandou, Pic-de-Fon, Zogota (using data [7]):

1 – Archean gneiss complex; 2 – Late Archean Liberian pilingenetic intrusive complex (Leone-Liberian massif); 3 – Lower Proterozoic series: (1) Simandou (quartzites, schists, and itabirites), and (2) Nimba; 4 – Lower Proterozoic Birrimian volcanogenic-terrigenous protoplatform cover (Siguiri Basin); 5 – Early Proterozoic Eburonian intrusive complex; 6 – regional faults

толщи, распространяясь от дневной поверхности на глубину от 9 до 150 м. На месторождении Северный Симанду нижняя граница (подошва) рудного плаща резко изменчивая и местами погружается на глубину до 350 м. В то же время богатые руды над итабиритовой толщей местами отсутствуют: они эродированы на крутых скальных склонах и в днищах ручьёв, где обнажаются слабоокисленные итабириты. В разрезе плащеобразных рудных залежей выделяются две главные зоны: нижняя – рыхлых маргитовых руд и верхняя – крепких (скальных) гётит-гематитовых руд. Между этими зонами и неизменёнными итабиритами есть переходные разновидности, которые выделяются при визуальной документации керна и уточняются по химическому составу керновых проб.

К категории богатых относятся железные руды, не требующие обогащения перед металлургическим переделом. Наряду с содержанием железа (более 50 %) для таких руд важным является их физическое состояние (прочность и кусковатость), так как дроблёные до нужного размера (2–4 см) крепкие руды могут непосредственно поступать в доменное производство, а рыхлые руды требуют предварительного окучкования (агломерации). При документации керна по прочности выделялись крепкие руды (раскалываются при сильном ударе молотком) и рыхлые (слабосцементированные, рассыпающиеся при лёгком механическом воздействии). В каждом интервале керновой пробы длиной 1–2 м замерялась длина кусков крепкого керна (более 2–3 см) и их суммарная доля от 0 до 100 %. К крепким рудам отнесены интервалы с долей крепкого керна > 75 % (в среднем около 85 %), к рыхлым – < 15% (в среднем около 5 %). Остальные интервалы относились к смешанным рыхло-крепким рудам.

Вертикальная зональность оруденения в профиле коры выветривания характеризуется ниже по материалам наиболее изученных месторождений Северный Симанду (участок Гафф) и Зогота (см. рис. 1). Оба месторождения весьма сходны по геологическому строению, характеристикам руд и вмещающих пород, поэтому рассматриваются ниже совместно. Зональность оруденения иллюстрируется разре-



зами по буровым профилям (рис. 2). Зональность удобнее рассмотреть снизу вверх, учитывая последовательное изменение вещественного и физического состояния пород и рудных образований по направлению к дневной поверхности. В профиле коры выветривания по итабиритам выделяются: первичные крепкие итабириты → дезинтегрированные и мартитизированные итабириты → рыхлая кварц-мартитовая руда → рыхлая мартитовая и рыхлая мартит-лимонитовая руды → рыхло-крепкая и крепкая гётит-гематитовая руда → оруденелый делювий (канга и кираса).

*Первичные итабириты.* Неизменённые итабириты месторождений Северный Симанду и Зогота – это плотные, крепкие, полосчатые породы кварц-магнетитового состава с переменным количеством куммингтонита, играющего роль второстепенного (< 5 % объёма) или главного (> 5 %) минерала. Соответственно, выделяются две разновидности итабиритов: собственно итабирит (кварц + магнетит) и амфиболовый итабирит (кварц + магнетит + куммингтонит). Цвет полосчатых итабиритов в целом тёмно-серый, в амфиболовых разностях с зеленоватым оттенком. Магнитная восприимчивость пород ( $\chi$ ) весьма высокая – от  $250 \cdot 10^{-5}$  до  $1040 \cdot 10^{-5}$  ед. СИ. Объёмная масса варьируется от 3,1 до 3,8 т/м<sup>3</sup>, среднее значение – 3,2–3,4 т/м<sup>3</sup>.

Полосчатость в итабиритах обеих разновидностей плоскопараллельная, местами плейчатая (рис. 3, 4). Ширина полос изменяется от 0,5 до 5 мм, местами увеличена до 1–10 см. Полосчатость обусловлена чередованием светлых кварцевых и тёмных существенно магнетитовых полос. В амфиболовых итабиритах добавляются полосы, обогащённые куммингтонитом, которые без строгой регулярности чередуются с кварцевыми и магнетитовыми. Контакты прослоев филлитов среди итабиритов параллельны полосчатости, что подчёркивает наследование ею первичной осадочной слоистости. Среди плейчатых текстур в маломощных магнетит-кварцевых слойках часто наблюдается очень сложное смятие, которое могло происходить в ещё нелитифицированном осадке.

*Собственно итабириты* сложены кварцем на 50–60 об. % и магнетитом на 35–45 об. %.

Присутствуют куммингтонит (1–5 об. %), слюда (до 3 об. %), акцессорные минералы – гематит, пирит, халькопирит. Кварц в мономинеральных полосах слагает гранобластовые агрегаты с размером зёрен 0,02–0,2 мм. Смежные полосы образует магнетит в зёрнах размером до 0,05 мм в сростании с кварцем (рис. 5). Магнетит распространён также в идиоморфных метазёрнах (до 0,5 мм). Метаморфогенный гематит наблюдается в тонкой вкрапленности в кварце. Пирит образует кубические вкрапления (0,01–0,1 мм), спорадически слагает интенсивно пиритизированные полосы (см. рис. 4, а).

*Амфиболовые итабириты* помимо кварца, занимающего 35–50 % объёма породы, и магнетита (25–40 %) содержат куммингтонит (5–30 %). Куммингтонит – магнезиально-железистый амфибол, в котором электронно-зондовым микроанализом определено 10,1–12,4 % MgO и 32,2–34,8 % FeO [2]. Минерал слагает тёмно-зелёные полосы зернистых и волокнистых агрегатов с вкрапленностью магнетита. Включения мелких игольчатых кристалликов куммингтонита присутствуют в кварцевых полосах. Из второстепенных минералов в породах содержатся кальцит и биотит (в сумме до 5 %), из акцессорных – гематит и сульфиды (пирит, иногда марказит, пирротин, халькопирит). В амфиболовых итабиритах Зоготы в темноцветных полосах вместе с куммингтонитом встречаются пироксены (геденбергит, феррогиперстен), актинолит, хлоритоид, плагиоклаз. Пироксены образуют порфиробласты размером до 5 мм, мелкий геденбергит слагает отдельные полосы шириной до 1,5 мм (рис. 6).

*Мартитизированные и дезинтегрированные итабириты* слагают подзону начального изменения пород в профиле коры выветривания мощностью от первых метров до 50 м. Окисление пород фиксируется появлением в ещё крепких итабиритах коричневой окраски по прослоям с магнетитом и амфиболом (см. рис. 4, б). Выше по профилю за счёт послыйного выщелачивания кварца крепкие породы дезинтегрируются, распадаясь на плитки. В окисленных итабиритах магнитная восприимчивость резко уменьшается до  $(20–70) \cdot 10^{-5}$  ед. СИ.

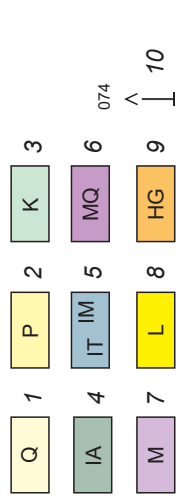
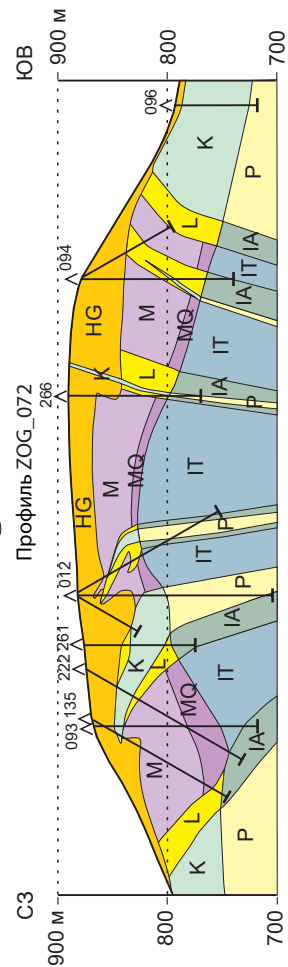
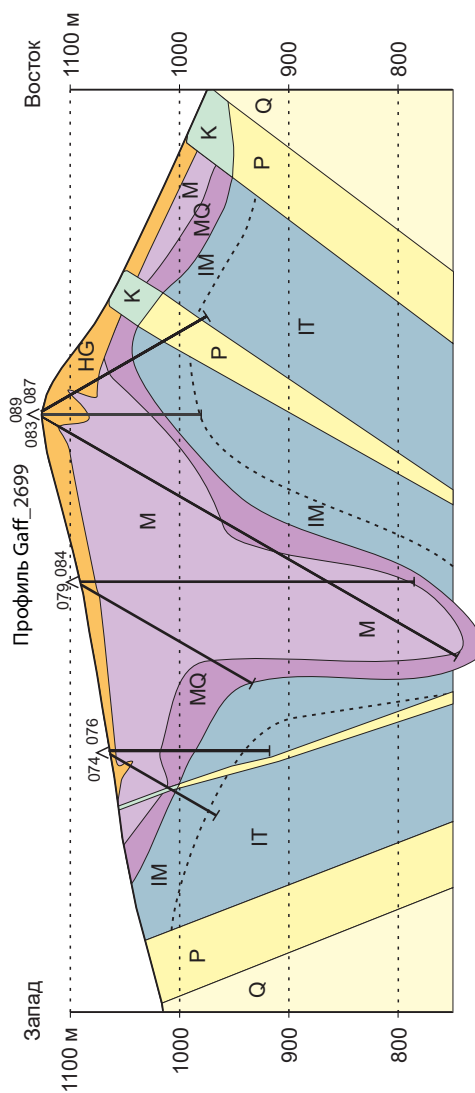
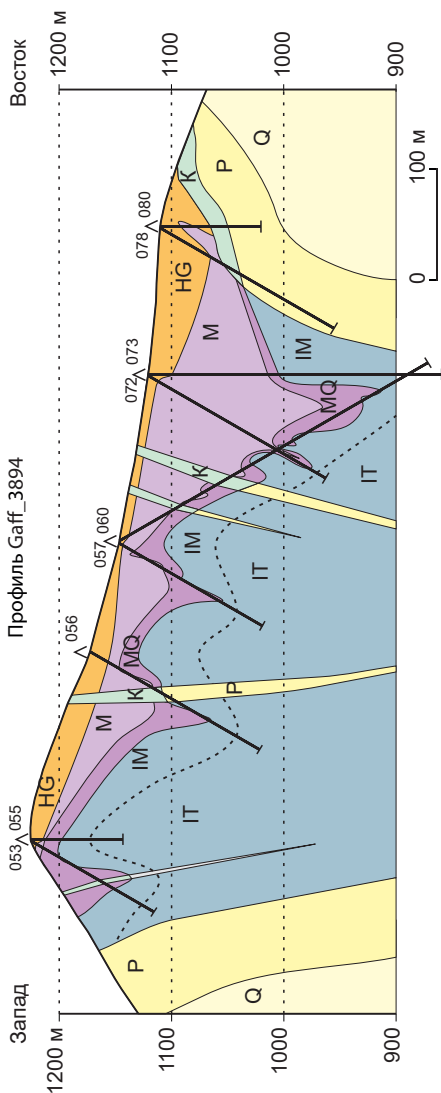


Рис. 2. Геологические разрезы по месторождениям Северный Симанду (профиль Gaff\_3894, Gaff\_2699) и Зогота (профиль ZOG\_072):

1 – кварциты; 2 – филлиты и слюдяные сланцы; 3 – иллит-каолиновая глина; 4 – амфиболовый итабирит; 5 – собственно итабирит первичный (IT) и мартигизированный (IM); 6 – кварц-мартиговая рыхлая руда; 7 – мартиговая рыхлая руда; 8 – мартиг-лимонитовая рыхлая руда; 9 – гётит-гематитовая рыхло-крепкая и крепкая руда; 10 – скважина и её номер

Fig. 2. Geological sections across the Northern Simandou (profiles Gaff\_3894, Gaff\_2699) and Zogota (profile ZOG\_072) ore deposits:

1 – quartzites; 2 – phyllites and mica schists; 3 – illite-kaolinite clay; 4 – amphibole itabirite; 5 – itabirites: primary (IT) and martitized (IM); 6 – quartz-martite friable ore; 7 – martite friable ore; 8 – martite-limonite friable ore; 9 – goethite-hematite friable to solid ore; 10 – borehole and its number





**Рис. 3. Вертикально полосчатый итабирит в обнажениях:**

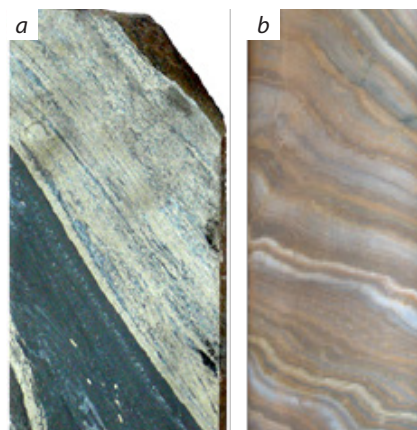
*a* – неизменённый (Северный Симанду); *b* – окисленный (Зогота)

**Fig. 3. Vertically banded itabirite in outcrops:**

*a* – unchanged (Northern Simandou); *b* – oxidized (Zogota)

В дезинтегрированных итабиритах средняя объёмная масса уменьшается до  $2,9 \text{ т/м}^3$ .

В окисленных итабиритах магнетит избирательно замещается гематитом (мартитом), а куммингтонит, пироксены, биотит и сульфиды – гидроксидами железа. Увеличивается пористость пород за счёт растворения и частичного выноса кремнезёма. Реликтовый кварц занимает в среднем 30–40 % объёма породы. Магнетит в количестве 5–15 % образует реликтовые зёрна и полосы среди агрегатов мартита (рис. 7). Мартит составляет до 35 %, гидроксиды железа (совместные агрегаты гётита и гидрогётита) – до 10–15 %. Гётит слагает каёмочные агрегаты вокруг зёрен мартита и кварца, частично замещает мартит. Куммингтонит



**Рис. 4. Итабирит Северного Симанду в керне (диаметр 63 мм):**

*a* – итабирит со светлой пиритизированной полосой (скв. 019 – 117,5 м); *b* – окисленный амфиболовый итабирит плейчатой текстуры (скв. 047 – 114 м)

**Fig. 4. Itabirite of Northern Simandou in drill core (diameter 63 mm):**

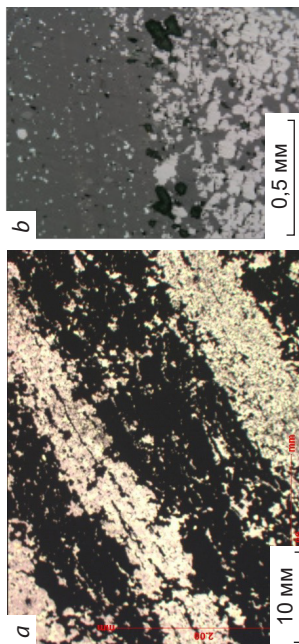
*a* – itabirite with a light-colored pyritized band (Borehole 019 – 117.5 m); *b* – oxidized amphibole itabirite with crenulated texture (Borehole 047 – 114 m)

почти полностью замещается лимонитом – микрозернистым гётит-гидрогётитовым агрегатом с жёлто-коричневыми внутренними рефлексамми.

*Кварц-мартитовая рыхлая руда* в профиле коры выветривания начинает зону полного разложения собственно итабиритов вплоть до рыхлого состояния. Мощность подзоны кварц-мартитовой руды составляет 10–20 м, местами до 50 м. Руда представлена сыпучим порошковатым материалом с остатками крепких плитчатых окисленных итабиритов. Порошок тёмно-серый или тёмно-коричневый с белёсым оттенком за счёт зёрен кварца. Гранулометрический анализ показывает, что около 70 % массы составляет зернистый материал размером менее 0,25 мм (рис. 8). По данным рентгенофазового, термического и минералогического анализов, основными минералами руды являются (мас. %): гематит (мартит) – 50–80, гётит + гидрогётит – 8–21, реликтовый кварц 5–25, магнетит 4–12. Объёмная насыпная масса руды варьируется в диапазоне  $2,2\text{--}3,3 \text{ т/м}^3$ , в среднем составляет  $2,7 \text{ т/м}^3$ . Магнитная воспри-

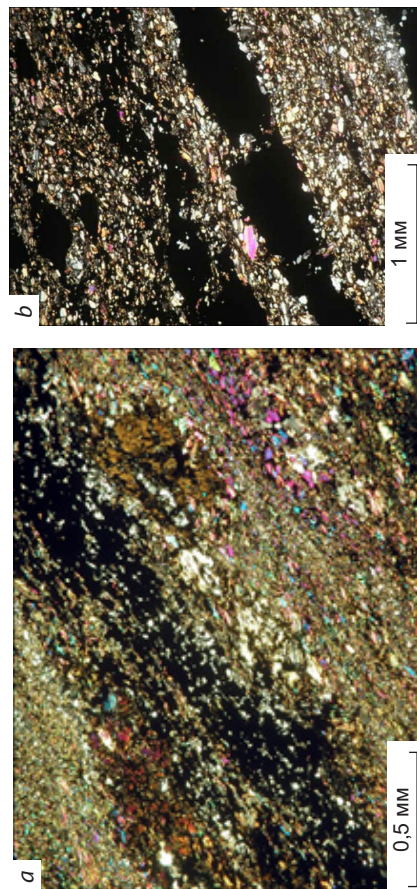
**Рис. 5. Собственно итабирит под микроскопом (Северный Симанду):**

*a* – в прозрачном шлифе чередование полос кварца (светлое) и магнетита (чёрное) (скв. 002 – 101 м, ник. парал.); *b* – в полированном шлифе полоса агрегата магнетита (светлое внизу) и кварца (тёмная полоса сверху) с мелкими вкраплениями гематита (светлое) (скв. 017 – 197 м)



**Fig. 5. Itabirite under microscope (Northern Simandou):**

*a* – in a transparent thin section: alternating bands of quartz (light) and magnetite (black) (Borehole 002 – 101 m, parallel nicols); *b* – in a polished section: a band of magnetite aggregate (light, at the bottom) and quartz (dark band, at the top) with little hematite impregnations (light) (Borehole 017 – 197 m)



**Рис. 6. Амфиоловый итабирит в прозрачных шлифах (Зогота, ник. скрещ.):**

*a* – полосы магнетита (чёрное) и куммингтонита (цветное) с порфиробластами феррогиперстена (тёмно-коричневое) (скв. 007 – 160 м); *b* – полосы мелкозернистого геденбергита (цветное) и магнетита (чёрное) (скв. 045 – 135 м)

**Fig. 6. Amphibole itabirite in transparent thin sections (Zogota, crossed nicols):**

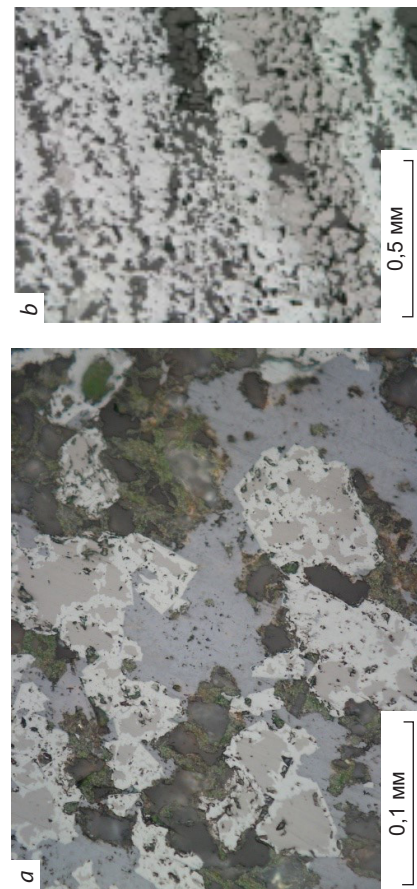
*a* – bands of magnetite (black) and cummingtonite (colored) with ferrohypersthene porphyroblasts (dark brown) (Borehole 007 – 160 m); *b* – bands of fine-grained hedenbergite (colored) and magnetite (black) (Borehole 045 – 135 m)

**Рис. 7. Мартитизированный итабирит в полированных шлифах (Северный Симанду):**

*a* – идиоморфные кристаллы магнетита (коричневое) частично замещены гематитом-мартитом (белое), серое – кварц, тёмное – поры (скв. 001 – 86 м); *b* – полосы мартита (белое) с реликтовой полосой магнетита (коричневое) (скв. 017 – 176 м)

**Fig. 7. Martitized itabirite in polished sections (Northern Simandou):**

*a* – euhedral magnetite crystals (brownish) partially replaced by hematite-martite (white); gray is quartz, dark are pores (Borehole 001 – 86 m); *b* – bands of martite (white) with a relic band of magnetite (brownish) (Borehole 017 – 176 m)



имчивость за счёт реликтового магнетита повышена, в среднем составляет  $(40-45) \cdot 10^{-5}$  ед. СИ.

*Мартитовая рыхлая руда (мартиты)* слагает основной объём зоны полного разложения собственно итабиритов. Вертикальная мощность подзоны рыхлых мартитов колеблется от 12 до 310 м. Руда тонкозернистая сыпучая (порошковая). По гранулометрии 60–80 % массы составляет материал зернистостью менее 0,25 мм (см. рис. 8, *b*). Среди порошковой руды присутствуют крепкие реликтовые пластины

окисленных итабиритов в количестве около 5 %. Мартитовая руда – чёрная с синеватым или местами коричневым оттенком за счёт плёнок гидроксидов железа вокруг зёрен мартита. В ненарушенном керне и обнажениях в мартитах видна унаследованная от итабиритов полосчатость. Главными минералами руды являются (мас. %): гематит (70–80) и гётит + гидрогётит (10–20), присутствуют реликтовые магнетит (1–5) и кварц (0,5–3), новообразованный гиббсит (0,5–3). В отдельных пробах диагно-



**Рис. 8. Рыхлые руды месторождения Северный Симанду (слева – образец, справа – ситовая фракция):**  
*a* – кварц-мартитовая руда (скв. 043 – 59 м, фракция  $-0,25+0,125$  мм с зёрнами кварца и чёрного мартита);  
*b* – мартитовая руда (скв. 007 – 128 м, фракция  $+1$  мм); *c* – мартит-лимонитовая руда (скв. 068 – 48 м, фракция  $-1+0,5$  мм)

**Fig. 8. Friable ores of the Northern Simandou deposit (sample on the left, sieve fraction on the right):**  
*a* – quartz-martite ore (Borehole 043 – 59 m, fraction  $-0.25+0.125$  mm with grains of quartz and black martite);  
*b* – martite ore (Borehole 007 – 128 m, fraction  $+1$  mm); *c* – martite-limonite ore (Borehole 068 – 48 m, fraction  $-1+0.5$  mm)



стируются анатаз, рутил, диаспор. Объёмная насыпная масса мартитовой руды в среднем около  $3,0 \text{ т/м}^3$ , магнитная восприимчивость  $(30-40) \cdot 10^{-5}$  ед. СИ.

На месторождении Пик-де-Фон, по данным [6], также преобладает рыхлая порошковая мартитовая руда, перемежающаяся с интервалами руды пластинчатого сложения (рис. 9). В приповерхностной зоне до глубины 10–20 м руды сильно лимонитизированы и сверху покрыты крепкой гётит-гидрогётитовой коркой (кирасой) мощностью 0,5–2 м.

Мартит-лимонитовая рыхлая руда сформирована в основном по амфиболовым итаби-

ритам. На месторождении Северный Симанду руда этого типа распространена ограниченно в прослоях мощностью 1–10 м среди рыхлых мартитовых и крепких гётит-гематитовых руд. На Зоготе мартит-лимонитовая руда распространена гораздо шире. Она развивается по мощным пачкам амфиболовых итабиритов, участвующим в строении итабиритовой толщи. Порошковая мартит-лимонитовая руда выделяется жёлто-коричневым цветом за счёт большого содержания лимонита (гётит + гидрогётит) (см. рис. 8, с). Объёмная насыпная масса руды  $2,1-2,3 \text{ т/м}^3$ , магнитная восприимчивость  $(20-40) \cdot 10^{-5}$  ед. СИ. Рентгенофазовым и термическим анализами в руде определяются (мас. %): гётит + гидрогётит 60–75, мартит 19–32, магнетит 1–10, гиббсит 2–7, кварц 1–3, диагностируются до 1 мас. % нонтронит, диаспор, рутил, анатаз. Мартит в руде в значительной степени замещён гидроксидами железа.

Гётит-гематитовая крепкая и рыхло-крепкая руды слагают верхнюю зону латеритной коры выветривания. Вертикальная мощность зоны колеблется от 1 до 120 м. Формирование крепкой руды обусловлено значительной гётитизацией мартитовой и мартит-лимонитовой руды. Развитие гётит-гидрогётитовых агрегатов укрепляет руду и меняет чёрный мартитовый цвет на коричневый разных оттенков. При документации керна удаётся отделить друг от друга протяжённые интервалы, в которых преобладает крепкая руда (с долей крепкого керна  $> 75 \%$ ), и интервалы разнородной рыхло-крепкой руды, в которых через 0,5–2 м чередуются крепкий и слабосцементированный материал.

Крепкая руда часто сохраняет унаследованную от итабиритов полосчатую текстуру с чередованием полос коричневого гётита и стально-серого гематита (рис. 10). Во многих местах полосчатость стирается, и руда становится кавернозной, массивной или брекчиевидной (рис. 11). По данным рентгенофазового и термического анализов, в руде преобладающим минералом остаётся (мас. %) гематит (30–70), гётит + гидрогётит составляют 20–50. В небольших количествах (1–5 мас. %) присутствуют магнетит, гиббсит, каолинит, кварц.



Рис. 9. Богатая руда ( $> 60 \%$  Fe) на месторождении Пик-де-Фон (фото из [6]):

*a* – рыхлая порошковая мартитовая (гематитовая) руда; *b* – пластинчатая гематитовая руда

Fig. 9. High-grade ore ( $> 60 \%$  Fe) at the Pic-de-Fon deposit (photo from [6]):

*a* – friable powdery hematite; *b* – friable biscuity hematite



Рис. 10. Полосчатая гётит-гематитовая руда в искусственном обнажении (Северный Симанду)

Fig. 10. Banded goethite-hematite ore in artificial outcrop (Northern Simandou)

Объёмная масса крепкой руды 3,2–3,6 т/м<sup>3</sup>, рыхло-крепкой 2,6–3,4 т/м<sup>3</sup>, магнитная восприимчивость руд (8–16)·10<sup>-5</sup> ед. СИ.

Под микроскопом в шлифах гётит-гематитовой руды наблюдались особенности и последовательность выделения гипергенных минералов. Выделяются три генерации (стадии) минерализации: мартитовая, гётит-гидрогётитовая (лимонитовая), поздняя гематитовая. Гематит-1 (первой генерации) образует псевдоморфозы замещения по первичному магнетиту (мартит). Они имеют плотное или тонкопористое сложение, в которых гематит-1 имеет скрытокристаллическую структуру или проявляет ясную пластинчатую форму (рис. 12).



Рис. 11. Замещение полосчатого стально-серого мартита коричневым кавернозным гётитом (Северный Симанду, скв. 039 – 3 м, керн диаметром 72 мм)

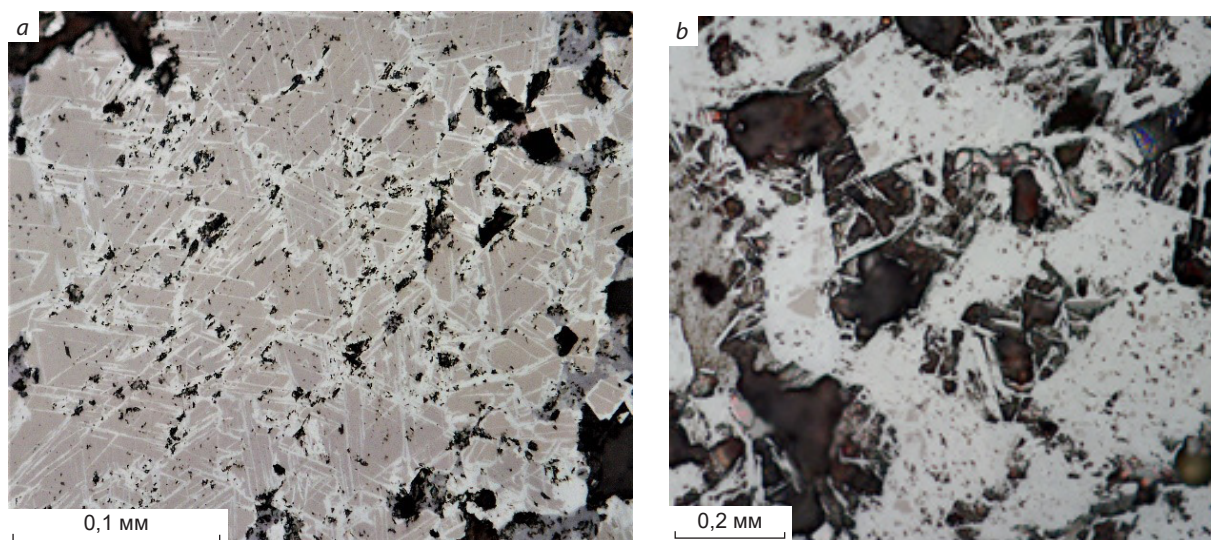
Fig. 11. Replacement of banded steel-gray martite with brown cavernous goethite (Northern Simandou, borehole 039 – 3 m, drill core 72 mm in diameter)

В мартите часто сохраняются остатки магнетита.

Вторая минеральная генерация представлена скрытокристаллическими, часто коллоидными агрегатами гётита-1 + гидрогётита-1 (первая генерация), которые окружают и цементируют мартитовые зёрна (рис. 13, *a, b*), замещают их вплоть до полных псевдоморфоз (рис. 13, *c, d*). В коллоидных агрегатах наблюдаются зонки с различной отражательной способностью: пониженной у гидрогётита, умеренной у гётита и резко повышенной у гематита-2.

Третья минеральная генерация проявлена метакристаллами и прожилками. Среди агрегатов гётита-1 + гидрогётита-1 в форме замещающих метакристаллов встречаются сравнительно крупные пластинчатые кристаллы гематита-3 (спекулярит, или железная слюдка) (рис. 14, *a*). Гематит-3 встречается также в зернистых агрегатах в прожилковидных выделениях и в цементе обломков гётита-1 (см. рис. 14, *b*). Пустоты среди агрегатов гидрогётита-1 + гётита-1 часто обрамлены шестоватыми кристаллами гётита-2 и пластинчатого гематита-3 (рис. 14, *c*). Пустоты заполняются также гиббситом. Поздний пирит в форме кубических метакристаллов наблюдался в прожилке гётита-2 (см. рис. 14, *d*).

*Канга и кираса.* На Северном Симанду и Зоготе кангой называются оруденелые крупнообломочные делювиальные отложения, завершающие профиль латеритной коры вывет-



**Рис. 12. Мартитизация итабиритов (Северный Симанду, полированные шлифы):**

*a* – начальная степень мартитизации с образованием пластинчатых кристаллов гематита-1 (белое) в зерне магнетита (тёмное) (скв. 009 – 50 м); *b* – почти полные псевдоморфозы пластинчатого гематита-1 (белое) по магнетиту, чёрное – пустоты (скв. 008 – 31 м)

**Fig. 12. Martitization of itabirites (Northern Simandou, polished sections):**

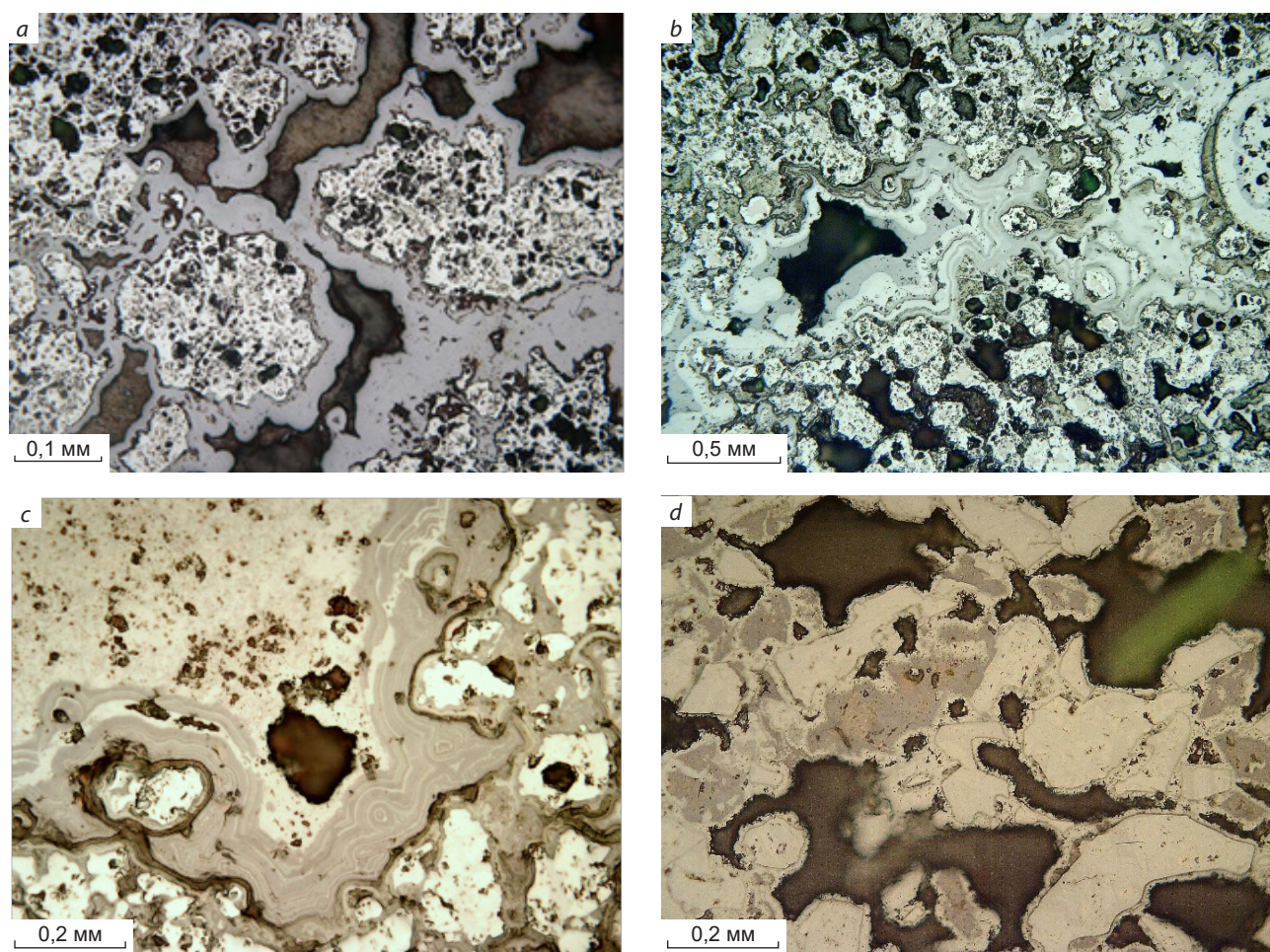
*a* – martitization of initial degree with formation of lamellar hematite-1 crystals (white) in a grain of magnetite (brownish) (Borehole 009 – 50 m); *b* – almost complete pseudomorphs of lamellar hematite-1 (white) after magnetite; black are voids (Borehole 008 – 31 m)

ривания (*canga* в Бразилии – железистая брекчия или конгломерат с лимонитовым цементом). Шлейф рыхло-крепких отложений канги мощностью до 10–12 м на многих участках Северного Симанду покрывает склоны итабиритовых хребтов и распространяется до 1 км за краем итабиритовой толщи. На Зоготе на юго-восточном подножии хребта скважинами вскрыта канга мощностью до 40 м. Её отложения содержат обломки гётит-гематитовых руд, окисленных итабиритов, вмещающих кварцитов и филлитов. Размер обломков от 0,5–5 см до угловатых глыб 0,3–0,5 м, цемент насыщен гидроксидами железа (лимонит). По содержанию Fe 40–66 мас. % (в среднем 57,4 мас. %) канга приближается к богатой железной руде.

Кирасой (фр. *cuirasse* – панцирь, броня) называется самый верхний слой делювиальных обломочных отложений, который отличается очень крепким сложением благодаря насыщению цемента плотными натёчными гидроксидами железа. Кираса на обширной территории

слоем мощностью 0–2 м, местами до 5 м, покрывает кангу, гётит-гематитовые и мартитовые руды, окисленные итабириты, окружающие выветрелые филлиты и кварциты. В кирасе над итабиритами угловатый обломочный материал представлен преимущественно крепкими гётит-гематитовыми рудами (рис. 15, *a*). Такая кираса содержит 50–65 мас. % Fe и может быть объединена с нижележащей псевдоморфной гётит-гематитовой рудой. При удалении от итабиритовых хребтов обломки в кирасе уменьшаются в размере, округляются, увеличивается доля обломков пустых местных пород (см. рис. 15, *b*). В результате содержание железа в кирасе падает до 40 % и менее. Во врезках современных речных долин кираса разрушается до свалов глыб и округлых обломков.

*Кора выветривания по филлитам.* На площади Северного Симанду неизменённые филлиты представлены тонкосланцеватыми породами тёмно-серого и чёрного цвета. В их составе кварц, тонкочешуйчатая слюда (серицит),



**Рис. 13. Замещение мартита гидроксидами железа (полированные шлифы):**

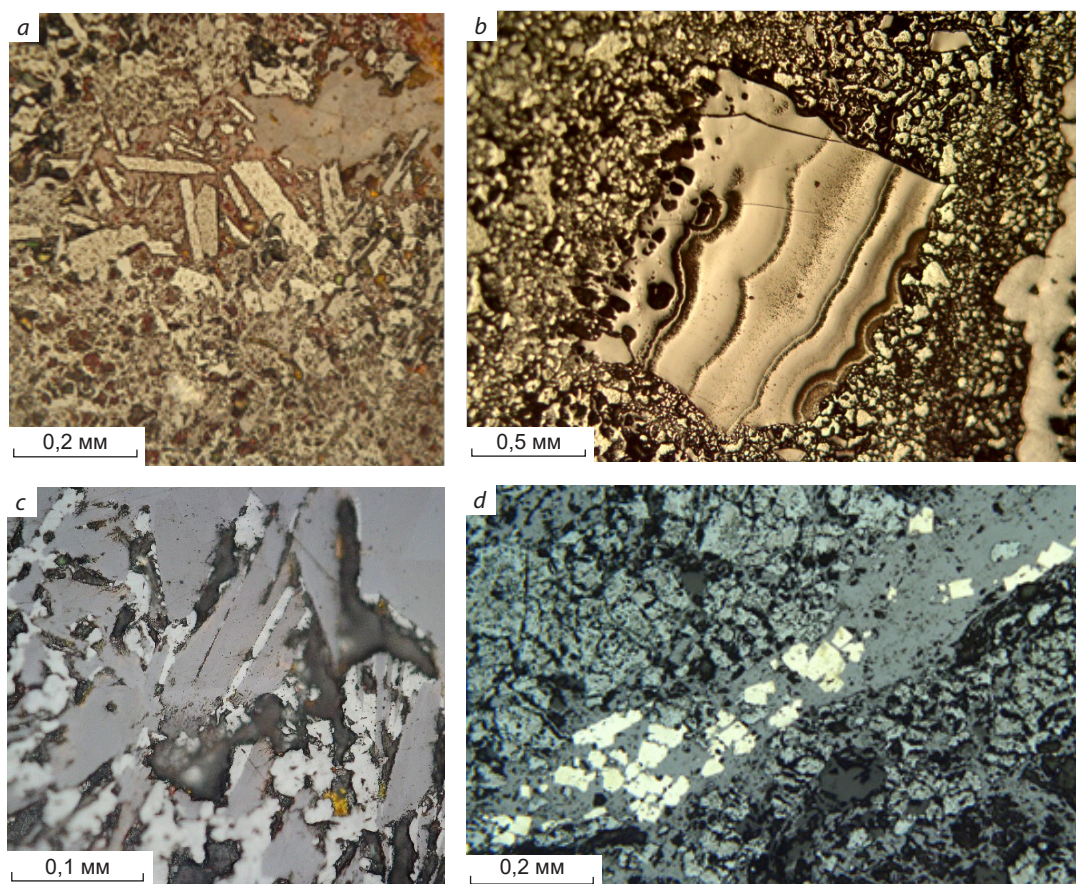
*a* – тонкопористый мартит (белое) окружён каймой гидрогётита-1 (серое), тёмное – пустоты (скв. 020 – 21 м); *b* – колломорфные выделения гётита-1 и гидрогётита-1 среди мартита (скв. 020 – 23 м); *c* – зёрна мартита (белое) в реликтах среди колломорфного агрегата гидрогётита-1 (серое) и гётита-1 (светло-серое), Северный Симанду (скв. 013 – 19 м); *d* – гётит-1 (светло-серое) в полных псевдоморфозах по зёрнам мартита и в каймах вокруг псевдоморфоз, серое – гидрогётит-1, тёмное – пустоты, Зогота (скв. 210 – 4 м)

**Fig. 13. Replacement of martite with iron hydroxides (polished sections):**

*a* – finely porous martite (white) surrounded by a rim of hydrogoethite-1 (gray); black are voids (Borehole 020 – 21 m); *b* – colloform segregations of goethite-1 and hydrogoethite-1 among martite (Borehole 020 – 23 m); *c* – martite grains (white) in relics among colloform aggregates of hydrogoethite-1 (gray) and goethite-1 (light gray), Northern Simandou (Borehole 013 – 19 m); *d* – goethite-1 (light gray) as complete pseudomorphs after martite grains and in rims around the pseudomorphs; gray is hydrogoethite-1, dark are voids, Zogota (Borehole 210 – 4 m)

повышенное содержание углеродистого вещества 0,1–1,3 мас. %, иногда отмечаются хлорит и пирит. Среди итабиритов филлиты слагают прослой мощностью 0,2–5 м, местами более. Среди железорудных залежей филлиты находятся в разной степени выветрелости. Изме-

нения пород начинаются с осветления за счёт выноса чёрного углеродистого пигмента, затем породы переходят в рыхлую светлую иллит-каолинитовую глину (рис. 16, *a*), в которой рентгенофазовым анализом дополнительно определяются кварц, нонтронит, гиббсит, рутил.



**Рис. 14. Поздние генерации гематита, гётита и пирита (полированные шлифы):**

*a* – лейстовидные метакристаллы гематита-3 (светлое) в гётит-гидрогётитовом-1 агрегате, Северный Симанду (скв. 014 – 8 м); *b* – обломок колломорфного гётита-1 в тонкозернистом агрегате гематита-3 (светлое), Зогота (скв. 210 – 11 м); *c* – в пустоте пластинчатые кристаллы гематита-3 (белое) в сростании с шестоватым гётитом-2 (светло-серое) с пустотами (тёмное) (скв. 003 – 11 м); *d* – в мартит-гётитовом-1 агрегате прожилок гётита-2 (светое) с метакристаллами позднего пирита (белое) (скв. 052 – 96 м)

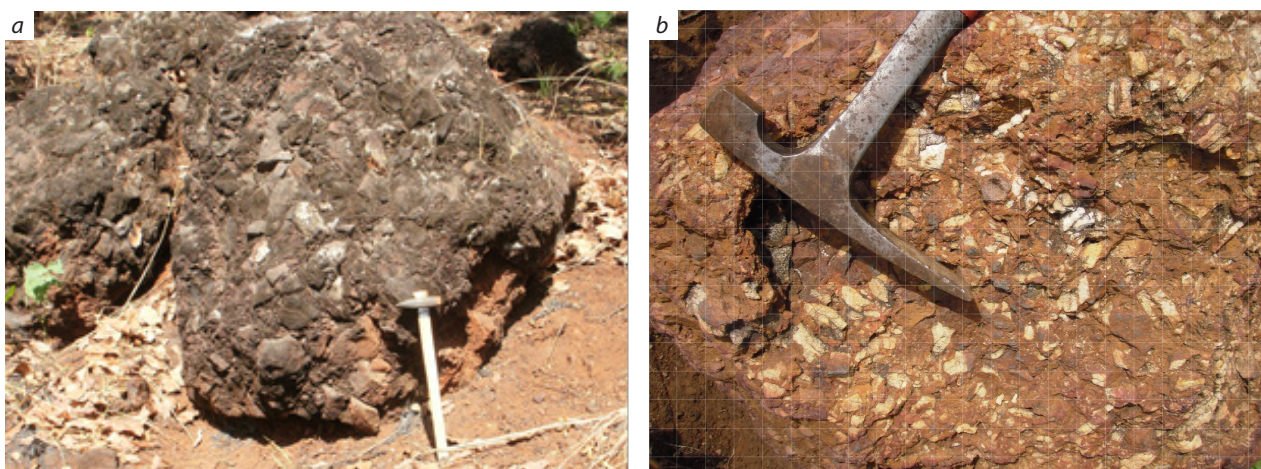
**Fig. 14. Late generations of hematite, goethite and pyrite (polished sections):**

*a* – lamellar metacrystals of hematite-3 (light) in goethite-hydrogoethite-1 aggregate, Northern Simandou (Borehole 014 – 8 m); *b* – colloform goethite-1 fragment in fine-grained aggregate of hematite-3 (light), Zogota (Borehole 210 – 11 m); *c* – lamellar crystals of hematite-3 (white) intergrown with columnar goethite-2 (light gray) with voids (dark) (Borehole 003 – 11 m); *d* – veinlet of goethite-2 (gray) with late pyrite metacrystals (white), transecting the martite-goethite-1 aggregate (Borehole 052 – 96 m)

Местами глины сильно пропитаны гидроксидами железа (Fe до 35–50 %). Объёмная масса глин 1,8–2,0 т/м<sup>3</sup>, что намного меньше, чем у первичных филлитов (2,7 т/м<sup>3</sup>), магнитная восприимчивость минимальная – до 2·10<sup>-5</sup> ед. СИ.

На месторождении Северный Симанду продуктом наиболее глубокого выветривания филлитовых прослоев являются бокситоносные глины вплоть до бокситов (см. рис. 16, *b*).

В состав бокситов входят (мас. %): гиббсит 20–58, гематит + гётит до 50, иллит + каолинит до 20, кварц 0,5–3, диаспор, рутил и крандаллит до 1. На месторождении Зогота слюдяные сланцы в прослоях среди железной руды до глубины около 100 м также замещены иллит-каолининовой глиной, а до глубины 30 м встречаются бокситы, содержащие (мас. %) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (44–58), SiO<sub>2</sub> (1,3–8,4), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5–26). Со-



**Рис. 15. Глыбы кирасы, Северный Симанду:**

*a* – кираса рудная крупнообломочная; *b* – кираса безрудная с мелкими светлыми обломками пустых кварцитов и сланцев в лимонитовом цементе

**Fig. 17. Blocks of cuirass (Northern Simandou):**

*a* – a large-block ore cuirass; *b* – a cuirass with small light fragments of empty quartzites and shales in limonite cement



**Рис. 16. Глина и бокситы (кern диаметром 122 мм):**

*a* – белая иллит-каолинистая глина по филлиту, Северный Симанду (скв. 029 – 153 м); *b* – гематит-гипсбитовый боксит, Северный Симанду (скв. 029 – 124 м); боксит Зоготы: *c* – в керне (скв. 262 – 7 м), *d* – в прозрачном шлифе (ник. парал.): гипсбит-2 (белое) выполняет пустоты в коричневом агрегате гипсбит-1 + иллит + лимонит

**Fig. 18. Clay and bauxite (drill core with a diameter of 122 mm):**

*a* – white illite-kaolinite clay by phyllite, Northern Simandou (Borehole 029 – 153 m); *b* – hematite-gibbsite bauxite, Northern Simandou (Borehole 029 – 124 m); Zogota bauxite: *c* – in the core (Borehole 262 – 7 m), *d* – in transparent section (parallel nicols): gibbsite-2 (white) performs voids in the brown aggregate gibbsite-1 + illite + limonite

путствующая железнорууденению бокситоноснось на месторождениях района Симанду заслуживает дальнейшего изучения для оценки её практического значения.

**Химический состав железных руд.** Химический состав рядовых керновых проб определялся рентгенофлуоресцентным методом и включал  $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и ППП (потери при прокаливании). По месторождениям Северный Симанду и Зогота из числа имевшихся анализов нами рассчитан средний химический состав основных типов руд и пород (табл. 1). К категории богатой железной руды (с бортовым содержанием 50 % Fe) относятся три типа руд: мартитовый со средним содержанием железа 66,27–64,95 % (Северный Симанду – Зогота), гётит-гематитовый (63,76–62,34 %), мартит-лимонитовый (60,73–59,31 %). На Северном Симанду резко преобладает мартитовая руда, составляющая 72 % от общего объёма богатых руд. Гётит-гематитовая руда занимает 26 об. %, мартит-лимонитовая – около 2 об. %. На месторождении Зогота по объёму преобладает гётит-гематитовая руда – 45 %, мартитовая руда составляет 38 об. %, мартит-лимонитовая – 17 об. %. Более широкое распространение мартит-лимонитовой руды на Зоготе обусловлено большей долей в первичной итабиритовой толще амфиболовой разновидности итабиритов. По этой причине и в других типах руд Зоготы (мартиговом и гётит-гематитовом) выше роль гидроксидов железа, что выражается в больших ППП кристаллизационной воды. В итоге среднее содержание железа в рудных типах Зоготы на 1,3–1,4 % ниже по сравнению с Северным Симанду (см. табл. 1).

К рядовым железным рудам, требующим обогащения, можно отнести: кварц-мартитовую, содержащую в среднем 57,66–57,17 % Fe, кангу (51,86–41,19 %). Потенциальными железными рудами являются также мартитизированные итабириты (42,82–43,29 %), неизменённые магнетитовые итабириты (39,55–39,60 %) и амфиболовые итабириты (36,46–34,43 %). Последние за счёт куммингтонита, пироксенов и кальцита выделяются повышенным содержанием  $\text{MgO}$  (2,07–1,49 %) и  $\text{CaO}$  (1,28–0,81 %).

Существенными компонентами железных руд являются кремнезём  $\text{SiO}_2$  и глинозём  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , связанные с присутствием в рудах кварца, каолинита и гиббсита. Высокое содержание кремнезёма (14,75–13,71 %) отличает кварц-мартитовый тип руд, повышенное – мартит-лимонитовый (3,88–2,16 %). Минимально содержание  $\text{SiO}_2$  в мартитовой (1,45 %) и гётит-гематитовой руде (0,94–1,36 %). Обращает внимание повышенное среднее содержание в богатых рудах глинозёма (1,26–4,30 %), которое заметно выше, чем в материнских итабиритах (0,37–1,01 %). С содержанием глинозёма прямо коррелируется примесь  $\text{TiO}_2$ , достигающая 0,38–0,83 % в рудной канге. Содержание оксида фосфора в богатых рудах 0,15–0,29 %. Другие компоненты присутствуют в рудах в практически незначимых средних содержаниях (%):  $\text{MnO} \leq 0,1$ ,  $\text{MgO} \leq 0,03$ ,  $\text{CaO} \leq 0,01$ ,  $\text{Na}_2\text{O} \leq 0,03$ ,  $\text{K}_2\text{O} \leq 0,01$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5 \leq 0,01$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3 \leq 0,01$ . Разубоживающее влияние на железные руды оказывают глинистые прослои. Они легко выделяются визуально, благодаря чему возможна их селективная выемка в добычном карьере.

Латеритное выветривание итабиритов и рудообразование сопровождаются значительным массопереносом вещества. Более отчётливый взгляд на баланс вещества даёт изоволюметрический расчёт, то есть расчёт массы главных химических компонентов, содержащихся в кубическом метре руды (табл. 2). На примере месторождения Северный Симанду видно, что главный процесс при выветривании итабиритов – последовательный и глубокий вынос (выщелачивание) кремнезёма. Первичное количество  $\text{SiO}_2$  в итабиритах около 1,4 т/м<sup>3</sup>, в мартитизированных итабиритах оно уменьшается до 1,22 т/м<sup>3</sup>, резко сокращается в кварц-мартитовой руде до 0,40 т/м<sup>3</sup> и достигает минимума 0,09–0,03 т/м<sup>3</sup> в богатой руде. Вместе с кремнезёмом из итабиритов почти полностью выносятся магний и кальций.

Основная масса железа в рудах наследуется из итабиритов, содержащих 1,8–2,0 т/м<sup>3</sup>  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . В богатых рудах железо накапливается дополнительно в большом количестве – содержание  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в мартитовой руде увеличивается до 2,83 т/м<sup>3</sup> и достигает максимума 3,05 т/м<sup>3</sup>



Табл. 1. Средний химический состав основных типов железных руд и пород по данным рентгенофлуоресцентного анализа керновых проб (месторождения Северный Симанду, Зогота, Пик-де-Фон)

Table 1. Average chemical composition of the main types of iron ores and rocks according to X-ray fluorescence analysis of core samples (Northern Simandou, Zogota and Pic-de-Fon deposits)

Тип руд и пород	*	Число проб	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ., %	SiO <sub>2</sub> , %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	TiO <sub>2</sub> , %	MnO, %	MgO, %	CaO, %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %	ППП, %	Fe <sub>общ.</sub> , %	Объёмная масса, т/м <sup>3</sup>	МВ (X), 10 <sup>-5</sup> ед. СИ
Безрудные глинистые прослои	С	455	23,92	23	39,69	0,96	0,14	0,23	0,01	0,3	10,57	16,74	2,06	2
	С	143	29,98	26,92	26,9	0,72	0,04	0,23	0,03	0,13	13,15	20,98	1,9	0,5
Канга	С	92	74,16	2,01	12,4	0,38	0,03	0,03	0	0,25	10,47	51,86	3,09	14
	С	34	58,9	6,61	19,64	0,83	0,02	0,07	0,01	0,15	13,73	41,19	2,03	2
Гёит-гемагитовый крепкий и рыхло-крепкий	С	1837	91,18	0,94	3,16	0,09	0,04	0,03	0,01	0,22	4,34	63,76	3,34	16
	С	694	89,14	1,36	3,06	0,11	0,06	0,03	0,01	0,22	6,07	62,34	2,94	9
Маргит-лимонитовый рыхлый	С	129	86,84	3,88	3,36	0,09	0,2	0,03	0,01	0,29	5,07	60,73	2,2	29
	С	268	84,85	2,16	4,30	0,13	0,13	0,03	0,01	0,24	8,35	59,31	2,07	7
Маргитовый (< 5 % SiO <sub>2</sub> ) рыхлый	С	3147	94,77	1,45	1,26	0,02	0,1	0,03	0,01	0,15	2,34	66,27	2,99	38
	С	579	92,88	1,45	1,67	0,04	0,1	0,03	0,01	0,2	3,75	64,95	2,57	41
Кварц-маргитовый (> 5 % SiO <sub>2</sub> ) рыхлый	П	3	90,2	4,4	0,22	0,003	0,006	0,05	0,06	0,04	-	63,1	-	-
	С	924	82,46	14,75	0,73	0,01	0,08	0,03	0,01	0,13	1,86	57,66	2,74	43
Итабирит маргитизированный	С	280	78,46	13,71	1,27	0,02	0,12	0,03	0,02	0,18	3,06	57,17	2,39	39
	С	712	61,23	36,88	0,41	0,01	0,05	0,06	0,01	0,1	1,28	42,82	3,31	55
Итабирит магнетитовый (MgO < 1,2 %)	С	290	61,77	35,13	0,45	0,01	0,06	0,14	0,08	0,1	2,07	43,29	2,88	-
	С	73	56,56	42,54	0,37	0,01	0,02	0,33	0,12	0,08	0	39,55	3,43	609
Итабирит амфиболовый (MgO > 1,2 %)	С	21	56,64	40,55	0,41	0,01	0,03	0,64	0,42	0,14	0,89	39,6	3,19	-
	П	24	50	47,5	0,12	0,02	0,04	0,05	0,05	0,04	1,3	35	3,31	-
Итабирит амфиболовый (MgO > 1,2 %)	С	112	52,14	40,49	0,85	0,03	0,05	2,07	1,28	0,12	2,57	36,46	3,45	609
	С	20	49,2	45,55	1,01	0,03	0,1	1,49	0,81	0,13	1,35	34,43	3,35	-

Примечание. \* Месторождения: С – Северный Симанду, З – Зогота, П – Пик-де-Фон по [2, 5]. Во всех типах руд (%): Na<sub>2</sub>O ≤ 0,03, K<sub>2</sub>O ≤ 0,02, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ≤ 0,01, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≤ 0,01; ППП – потери при прокаливании; МВ – магнитная восприимчивость; - – нет данных.

Note. \* Deposits: С – Northern Simandou, З – Zogota, П – Pic-de-Fon according to [2, 5]; in all types of ores (%): Na<sub>2</sub>O ≤ 0,03, K<sub>2</sub>O ≤ 0,02, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ≤ 0,01, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≤ 0,01. ППП – losses during calcination; МВ – magnetic susceptibility; - – no data



Табл. 2. Среднее содержание основных компонентов в разных типах руд и пород (Северный Симанду)

Table 2. Average content of the main components in different types of ores and rocks (Northern Simandou)

Тип руд и пород	Число проб	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ., %	SiO <sub>2</sub> , %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	Объёмная масса, т/м <sup>3</sup>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ., т/м <sup>3</sup>	SiO <sub>2</sub> , т/м <sup>3</sup>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , т/м <sup>3</sup>
Гётит-гематитовый крепкий	1837	91,18	0,94	3,16	3,34	3,05	0,03	0,11
Мартит-лимонитовый рыхлый (> 6 % ППП)	129	86,84	3,88	3,36	2,2*	1,91	0,09	0,07
Мартитовый (< 5 % SiO <sub>2</sub> ) рыхлый	3147	94,77	1,45	1,26	3*	2,83	0,04	0,04
Кварц-мартитовый (> 5 % SiO <sub>2</sub> ) рыхлый	924	82,46	14,75	0,73	2,74*	2,26	0,4	0,02
Итабирит мартитизированный	712	61,23	36,88	0,41	3,31	2,03	1,22	0,01
Итабирит магнетитовый (MgO < 1,2 %)	73	56,56	42,54	0,37	3,43	1,94	1,46	0,01
Итабирит амфиболовый (MgO > 1,2 %)	112	52,14	40,49	0,85	3,45	1,8	1,4	0,03

Примечание. \* – насыпная объёмная масса.

в гётит-гематитовой руде. Увеличение содержания железа в мартитовой руде может быть объяснено вероятной механической усадкой и уплотнением рыхлых мартитов, из которых почти полностью вынесен кварц. В первичных итабиритах кварц занимает 40–60 % объёма, тогда как современная пористость мартитовой руды 25–35 %. Другая несомненная причина увеличения количества железа в богатых рудах – дополнительный его привнос в мартиты, что находит выражение в развитии гидроксидов железа в форме плёнок, каёмки, колломорфных корок, заполняющих поровое пространство вокруг зёрен мартита.

Заметный привнос в богатые руды обнаруживает также глинозём Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – его содержание в гётит-гематитовой руде повышено до 0,11 т/м<sup>3</sup> по сравнению с 0,01–0,03 т/м<sup>3</sup> в итабиритах (см. табл. 2).

Основываясь на среднем химическом составе основных типов железных руд и химическом составе слагающих их минералов, для месторождения Северный Симанду рассчитан средний нормативный минеральный состав руд (табл. 3). Номинально все руды включают в себя гематит (с подчинённым количеством реликтового магнетита), гидроксиды железа (гётит с подчинённым количеством гидрогётита), кварц, каолинит и гиббсит. Во всех ти-

пах руд преобладает гематит. Главное различие между богатыми рудами – содержание гидроксидов железа (мас. %): 14,5 в мартитовом типе, 25 в гётит-гематитовом и 31 – в мартит-лимонитовом. Мартитовый тип руд наиболее чист от минеральной примеси кварца, каолинита и гиббсита.

**Выводы.** На юго-востоке Гвинеи в районе горного хребта Симанду в латеритной коре выветривания по итабиритам сформированы крупные запасы богатых железных руд. Богатые руды поверх итабиритов слагают вертикально-зональные плащеобразные залежи глубиной до 150–350 м.

В последовательности образования богатых железных руд на гипергенном этапе намечается следующий ряд основных процессов (стадий): 1) окислительный процесс мартитизации итабиритов, выраженный псевдоморфным замещением магнетита гематитом-1; 2) почти полное выщелачивание кварца из окисленных итабиритов с образованием рыхлой мартитовой руды при отсутствии сопряжённых скопленений переотложенного кремнезёма; 3) гётитизация рыхлой мартитовой руды в форме псевдоморфоз гидроксидов железа по мартиту, куммингтониту и в виде цемента порового пространства, что вело к образованию крепкой гётит-гематитовой руды; в то же время в



Табл. 3. Средний расчётный минеральный состав (мас. %) основных типов железных руд на месторождении Северный Симанду

Table 3. Average calculated mineral composition (wt. %) of the main types of iron ores at the Simandou deposit

Тип руд	Гематит Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (+ магнетит)	Гётит FeOOH + гидрогётит	Кварц SiO <sub>2</sub>	Каолинит Al <sub>4</sub> [Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ](OH) <sub>8</sub>	Гиббсит Al(OH) <sub>3</sub>
Гётит-гематитовый (HG)	69	25	0,2	1,8	3,5
Мартит-лимонитовый (L)	60	31	2	3,5	3
Мартитовый (M)	82	14,5	1	1	1,3
Кварц-мартитовый (MQ)	70	14	14,5	0,5	0,5

руды привносится глинозём с образованием гиббсита; 4) незначительная дегидратация руд с частичным замещением гидроксидов железа гематитом поздней генерации. С третьей и четвёртой стадиями можно связывать формирование делювиальной канги и кирасы как продуктов механического разрушения и перетолжения обломков гётит-гематитовой руды с лимонитизацией цемента.

Наиболее богатая руда – мартитовая, содержит в среднем 65,0–66,3 % Fe. Она формировалась по собственно итабиритам кварц-магнетитового состава. Эти породы отличаются двухкомпонентным первичным химическим составом (SiO<sub>2</sub> и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) с незначительным содержанием других примесей. Последующий глубокий вынос из пород кремнезёма обусловил высокую чистоту мартитовой руды от примесей. По амфиболовым итабиритам за счёт их гидратации и существенной примеси алюмосиликатных минералов образовалась рыхлая мартит-лимонитовая руда с пониженным содержанием железа (59,3–60,7 %) и существенным содержанием Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3,4–4,3 %), SiO<sub>2</sub> (2,2–3,9 %), ППП (5,07–8,35 %). Железосодержащие алюмосиликаты (куммингтонит, пироксен, биотит) избирательно замещались гидроксидами железа, а магнетит – гематитом. Третий тип богатой руды – крепкая гётит-гематитовая, содержит 62,3–63,8 % Fe, что ниже, чем в мартитовой руде, вследствие повышенной гидратации крепкой руды.

На месторождениях Зогота и Северный Симанду устанавливается пространственная сопряжённость (сонахождение) богатых железных руд и продуктов выветривания в прослоях

сланцев и филлитов. С мартитовыми рудами сопряжены иллит-каолинитовые глины, а с гётит-гематитовыми – бокситы. Регистрируемый по химическому составу привнос глинозёма в богатые железные руды подчёркивает принципиальное единство химической природы латеритного процесса, который, с одной стороны, приводит к формированию богатых железных руд на субстрате итабиритов, а с другой – к образованию бокситов на субстрате алюмосиликатных пород.

На известных бокситовых месторождениях северо-запада Гвинеи, по данным [5], в типовом профиле латеритной коры выветривания сверху вниз выделяются зоны (горизонты): гидроксидно-железистая кираса мощностью 0–2 м → бокситовая руда 7–9 м → глинисто-железистый (гётит + гематит) латерит 3–4 м → иллит-каолинитовая глина 6–9 м → коренные материнские породы. Последние представлены субгоризонтально залегающими алевролитами, аргиллитами и силлами долеритов. Общая глубина коры выветривания до материнских пород достигает 18–20 м. Бокситовая руда по морфологии представляет собой приповерхностное пластообразное тело сравнительно небольшой мощности 7–9 м. В химизме бокситообразования на фоне накопления глинозёма фиксируется заметный привнос железа, особенно в подстилающий нижний глинисто-железистый горизонт, содержащий от 20 до 80 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

В отличие от бокситов залежи богатых железных руд района Симанду имеют большой вертикальный размах до 150–350 м. При этом значительно колеблется по вертикали как верх-

ная граница, обусловленная расчленённым горным рельефом, так и подошва залежей. Вероятно, крутопадающие неоднородности итабиритов (полосчатость, трещины кливажа) способствовали неравномерному и местами глубокому проникновению метеорных вод. К тому же слабокислые воды, растворяющие кремнезём, не встречали в составе итабиритов нейтрализующих щёлочноземельных элементов, что облегчало химическое воздействие и глубокое проникновение слабокислых вод в породы. Следует отметить феномен бесследного выноса большого объёма кремнезёма при формировании маритовой руды, так как в окружении руд среди вмещающих филлитов не обнаруживается никаких скоплений переотложенного кварца. Общими условиями для образования бокситов и богатых железных руд являются жаркий и переменнно-влажный климат с сезонным выпадением обильных дождей, наличие в профиле выветривания мощной гидрологической зоны инфильтрации и аэрации, присутствие в почвенном покрове органического вещества, способствующего переводу железа в подвижное двухвалентное состояние.

Генезис эпигенетических богатых гематит-маритовых руд в полосчато-железистых формациях мира в литературе рассматривается по-разному – как метаморфогенно-гидротермальный, древний гипергенный и молодой кайнозойский гипергенный [1]. Месторождения рудного района Симанду однозначно доказывают молодое гипергенное происхождение рыхлых маритовых, лимонитовых и крепких гётит-гематитовых руд, которые составляют закономерную последовательность зон латеритной коры выветривания, заключённых между материнскими итабиритами и современной дневной поверхностью.

Выявление генетической связи железного оруденения и бокситообразования позволяет синхронизировать формирование богатых железных руд района с образованием бокситов северо-запада Гвинеи. Возраст большинства бокситовых месторождений определяется приуроченностью к региональной поверхности выравнивания неогенового средне-позднемиоце-

нового возраста, которая в современном рельефе располагается на высотном уровне до 1150 м [4]. Другие более высокие поверхности выравнивания в геоморфологии региона рассматриваются как более древние. Железорудные месторождения района Симанду располагаются на выровненных поверхностях от 850–910 м на Зоготе (средний миоцен) до 1250–1450 м на Северном Симанду (поздний эоцен – ранний миоцен) и до 1500–1650 м на Пик-де-Фон (маастрихт – средний эоцен). Следовательно, начало формирования богатой железной руды можно отнести к палеогеону.

Железные руды демонстрируют высокую устойчивость к денудации, слагая в современном рельефе водораздельную часть горных хребтов. Рыхлая маритовая руда остаётся надёжно бронированной плащом крепкой гётит-гематитовой руды. Даже покровы маломощной кирасы (до 2 м) достаточно для предохранения рыхлой руды от активной поверхностной эрозии, протекавшей в неоген-четвертичное время.

Богатые железные руды месторождений Северный Симанду, Пик-де-Фон и Зогота располагаются в простой горно-геологической обстановке, благоприятной для карьерной разработки. По содержанию железа (60–66 %) они находятся на уровне наиболее богатых месторождений Австралии, Бразилии, Индии, Южной Африки, России (Белгородский железорудный район). Правительством Гвинеи и инвесторами принят план по промышленному освоению железных руд района Симанду с постройкой железной дороги (около 670 км) и морского порта на западе Гвинеи [3]. В будущем крупным ресурсом легкообогащаемых руд, многократно превышающим запасы богатых руд, могут стать первичные магнетитовые итабириты, содержащие 36–40 % Fe.

## Список литературы

1. Белевцев Я. Н., Кулик Д. А., Коржнев М. Н. [и др.]. Железисто-кремнистые формации докембрия. – Киев : Наукова думка, 1992. – 228 с.
2. Болонин А. В., Мамедов В. И., Мызников И. К. Железистые кварциты горного хребта Симанду (Гвинеи) // Руды и металлы. –



2022. – № 3. – С. 57–77. – DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10017.

3. *Гвинейский железорудный проект Simandou, наконец, сдвинулся с места.* – URL: <https://www.metalinfo.ru/ru/news/139294> (дата обращения 31.05.2023).
4. *Мамедов В. И., Зайцев В. А., Макарова М. А., Пашков В. С.* Новый взгляд на геоморфологическое развитие рельефа Западной Африки // Доклады Российской Академии наук. Науки о земле. – 2020. – Т. 491, № 2. – С. 20–26. – DOI: 10.31857/S2686739720040118.
5. *Мамедов В. И., Макарова М. А., Боева Н. М., Внучков Д. А., Бортников Н. С.* Крупнейшая в мире бокситоносная провинция Фута Джалон-

Мандинго (Западная Африка). Часть 2: Влияние состава материнских пород на распространенность и качество бокситов // Геология рудных месторождений. – 2021. – Т. 63, № 6. – С. 576–602. – DOI: 10.31857/S001677702105004X.

6. *Cope I. L., Wilkinson J. J., Herrington R. J., Harris C. J.* Geology and Mineralogy of the Pic de Fon Iron Oxide Deposit, Simandou Range, Republic of Guinea, West Africa / Australasian Institute of Mining and Metallurgy. – 2005. – Spec. Publ. Ser. – № 8. – P. 43–48.
7. *Thieblemont D., Goujou J. C., Egal E., Cocherie A., Delor C., Lafon J. M., Fanning C. M.* Archean Evolution of the Leo Rise and Its Eburnean Reworking // Journal of African Earth Sciences. – 2004. – V. 39. – P. 97–104.

## References

1. Belevtsev Ya. N., Kulik D. A., Korzhnev M. N. [et al.]. Zhelezisto-kremnistye formatsii dokembriya [Ferrous-siliceous formations of the Precambrian], Kiev, Naukova dumka Publ., 1992, 228 p.
2. Bolonin A. V., Mamedov V. I., Myznikov I. K. Zhelezistye kvartcity gornogo khrebta Simandu (Gvineyskaya Respublika) [Iron quartzites of the Simandou mountain (Republic of Guinea)], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2022, No 3, pp. 57–77, DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10017. (In Russ.).
3. Gvineiskii zhelezorudnyi proekt Simandou, nakonets, sdivnulsya s mesta [Guinea's Simandou iron ore project has finally moved on], available at: <https://www.metalinfo.ru/ru/news/139294> (Accessed: 31.05.2023)
4. Mamedov V. I., Zaitsev V. A., Makarova M. A., Pashkov V. S. Novyi vzglyad na geomorfologicheskoe razvitie rel'efa Zapadnoi Afriki [New insights in geomorphological evolution of relief of Western Africa], *Doklady Rossiiskoi Akademii nauk. Nauki o zemle* [Reports of the Academy of Sciences], 2020, V. 491, No 2, pp. 20–26, DOI: 10.31857/S2686739720040118. (In Russ.).
5. Mamedov V. I., Makarova M. A., Boeva N. M., Vnuchkov D. A., Bortnikov N. S. Krupneishaya v mire boksitonosnaya provintsiya Futa Dzhallon-Mandingo (Zapadnaya Afrika). Chast' 2: Vliyanie sostava materinskikh porod na rasprostranennost' i kachestvo boksitov [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], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits], 2021, V. 63, No 6, pp. 576–602, DOI: 10.31857/S001677702105004X. (In Russ.).
6. Cope I. L., Wilkinson J. J., Herrington R. J., Harris C. J. Geology and Mineralogy of the Pic de Fon Iron Oxide Deposit, Simandou Range, Republic of Guinea, West Africa, *Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, 2005, Spec. Publ. Ser., No 8, pp. 43–48.
7. Thieblemont D., Goujou J. C., Egal E., Cocherie A., Delor C., Lafon J. M., Fanning C. M. Archean Evolution of the Leo Rise and Its Eburnean Reworking, *Journal of African Earth Sciences*, 2004, V. 39, pp. 97–104.

**Болонин Александр Васильевич** (bolonin.a@inbox.ru)

кандидат геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник <sup>1</sup>

**Мызников Игорь Константинович** кандидат геол.-минерал. наук, сотрудник <sup>2</sup>

**Нигматуллина Алла Михайловна** сотрудник <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов, Москва, Россия

<sup>2</sup> Geoprospects Ltd, city of Sangarédi, Republic of Guinea