

УДК 553.08

DOI: 10.24930/2500-302X-2024-24-5-848-863

Минеральный состав ксенолитов преобразованных толеитовых базальтов в рудовмещающих породах Рудногорского железорудного месторождения, Восточная Сибирь

Е. В. Шепель, Н. Р. Аюпова, А. С. Целуйко

Институт минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН,
456317, г. Миасс, e-mail: liena-safina@mail.ru

Поступила в редакцию 06.12.2023 г., принята к печати 26.01.2024 г.

Объект исследований. Изучен вещественный состав в разной степени измененных ксенолитов толеитовых базальтов в рудовмещающих породах Рудногорского железорудного месторождения Ангаро-Илимского района Восточной Сибири. *Цель работы.* Выявление последовательности минеральных преобразований при формировании магнетитовых руд. *Материалы и методы.* Исследован минеральный состав слабоизмененных и гематитизированных ксенолитов толеитовых базальтов в скарнированных породах и реликтовых продуктов преобразования гиало- и литокластов базальтов в оруденелых вулканокластических породах. Для идентификации минералов использованы порошковая рентгеновская дифрактометрия с определением количественных соотношений минеральных фаз (дифрактометр SHIMADZU XRD-6000 и ДРОН-2.0), микроскопические (микроскоп Olympus BX51), электронно-микроскопические (Tescan Vega 3 sbu с энергодисперсионным анализатором Oxford Instruments Xact) и ИК-спектроскопические (ИК фурье-спектрометр Spectrum One с микроскопом Multiscope фирмы PerkinElmer) методы исследований. *Результаты.* Установлено, что в ксенолитах слабоизмененных толеитовых базальтов вулканическое стекло смектитизировано и частично замещено вторичными агрегатами хлорита и карбоната. В гематитизированных ксенолитах выявлено, что в смектит-гематитовой ассоциации минералов присутствуют скарновые минералы – эпидот и гранат. Смектитовые агрегаты в ассоциации с хлоритом также обнаружены в цементирующей массе оруденелых вулканокластитов. По полученным значениям базальных отражений d_{001} в пределах 14.76–15.23 Å и рассчитанным кристаллохимическим формулам изученные смектиты относятся к сапонитам. Различия в морфологии, химическом составе и ИК-спектрометрических характеристиках смектитов отражают различную степень преобразования толеитовых базальтов в многостадийных рудообразующих процессах.

Ключевые слова: ксенолиты, толеитовые базальты, магнетитовые руды, Рудногорское месторождение, Восточная Сибирь

Источник финансирования

Исследования проведены по проекту РНФ “Создание минералого-геохимической теории гальмиролиза как фактора субмаринного железнакопления в осадочно-вулканогенных палеобассейнах” (№ 22-17-00215). Для исследований использован фактический материал, собранный при проведении полевых работ по госбюджетной теме Института минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (№ 122031600292-6)

Mineral composition of xenoliths of transformed tholeiitic basalts in ore-hosting rocks of the Rudnogorskoe iron ore deposit, Eastern Siberia

Elena V. Shepel, Nuriya R. Ayupova, Aleksandr S. Tselyuko

Institute of Mineralogy, South Ural Federal Scientific Center for Mineralogy and Geoecology, UB RAS,
Miass 456317, Russia, e-mail: liena-safina@mail.ru

Received 06.12.2023, accepted 26.01.2024

Research subject. Various-ly-altered tholeiitic basalt xenoliths in ore-hosting rocks from the Rudnogorskoe iron ore deposit, the Angaro-Ilim region of Eastern Siberia. *Aim.* To identify the sequence of mineral transformations during the formation of magnetite ores. *Materials and methods.* The mineral composition of weakly-altered and hematitized xenoliths

Для цитирования: Шепель Е.В., Аюпова Н.Р., Целуйко А.С. (2024) Минеральный состав ксенолитов преобразованных толеитовых базальтов в рудовмещающих породах Рудногорского железорудного месторождения, Восточная Сибирь. *Литосфера*, 24(5), 848–863. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-5-848-863>

For citation: Shepel E.V., Ayupova N.R., Tselyuko A.S. (2024) Mineral composition of xenoliths of transformed tholeiitic basalts in ore-hosting rocks of the Rudnogorskoe iron ore deposit, Eastern Siberia. *Lithosphere (Russia)*, 24(5), 848–863. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-5-848-863>

of tholeiitic basalts in skarned rocks and relics of basaltic hyalo- and lithoclasts in varying degrees magnetitized volcanoclastites were studied. Minerals were identified using a powder X-ray diffractometer with the determination of the quantitative ratios of mineral phases by SHIMADZU XRD-6000 and DRON-2.0 diffractometers and using the microscopic (Olympus BX51) and electron microscopic (Tescan Vega 3 sbu with an Oxford Instruments Xact energy-dispersive analyzer) and IR spectroscopic (Spectrum One IR Fourier-spectrometer and a Multiscope microscope, PerkinElmer) research methods. *Results.* In xenoliths of weakly-altered tholeiitic basalts, volcanic glass is smectitized and partially replaced by secondary aggregates of chlorite and carbonate. In hematitized xenoliths, the smectite-hematite mineral association contains skarn epidote and garnet. Smectite aggregates, partially transformed into magnetite mass, are present in the magnetitized volcanoclastites. The studied smectites are classified as saponite according to the obtained values of basal reflections d_{001} in the range of 14.76–15.23 Å and calculated crystal chemical formulas. The differences in the morphology, chemical composition, and IR spectrometric characteristics of smectites reflect the varying degrees of transformation of the tholeiitic basalts in multi-stage ore-forming processes.

Keywords: *xenoliths, tholeiitic basalts, magnetite ores, Rudnogorskoe deposit, Eastern Siberia*

Funding information

The mineralogical study was supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-17-00215). The field works were supported by state contract of the Institute of Mineralogy of the SU FRC MG UB RAS (No. 122031600292-6)

Acknowledgements

Belogub for consultation, M.A. Rassomakhin and P.V. Khvorov for SEM and X-ray analysis, respectively.

ВВЕДЕНИЕ

Рудногорское железорудное месторождение относится к наиболее известным объектам в Ангаро-Илимском рудном районе Восточно-Сибирской платформы, где пространственное размещение железорудности контролируется глубинными разломами фундамента, трапповыми магматическими центрами и залеганием доломитовых и эвапоритовых толщ (Фон-дер-Флаасс и др., 1992; Малич и др., 1999). Основные рудные тела Рудногорского месторождения круто погружаются на глубину 700–1200 м и, по мнению большинства исследователей, локализованы в так называемых сбlijенных диатремах или “трубках взрыва” (Фон-дер-Флаасс и др., 1992; Калугин и др., 1994; Соловьев, 2011) (рис. 1а). Трубочатые структуры заполнены различными базальтовыми образованиями и брекчиевыми породами, состоящими из обломков долеритов, осадочных пород, метасоматитов и магнетитовых руд в различных количественных соотношениях. Рудоносные трубки прорывают все стратиграфические уровни палеозойской осадочной толщи, образуя с поверхности расширенную кольцеобразную рудную зону, сложенную в основном ритмично-слоистой вулканогенно-осадочной толщей (Фон-дер-Флаасс, 1992). Считается, что глубинные каналы труб служили одновременно рудоподводящими структурами, а отложение магнетита в трубках произошло из гидротермальных рассолов (Polozov et al., 2016; Neumann et al., 2017).

Текстурные разновидности магнетитовых руд на месторождении, представленные массивными, полосчатými, оолитовыми, оолитоподобными (гравелитоподобными), крустификационными, плейчатými, тонкоплитчатыми, сланцеватыми, брекчиевыми, конгломератовыми и почковидными рудами, встречаются совместно, находясь в сложных взаимоотношениях (Жук-Почекутов и др., 1986). Особый интерес при определении формирования и последующего преобразования руд вызывают оолитовые магнетитовые руды, слагающие линзовидные и гнездообразные тела слоистой текстуры (мощность прослоев от 5 до 20 см и более) в полосчатых магнетитовых рудах. В оолитах наблюдаются все стадии преобразования нерудных обломков: от обволакивания их тоненькой каемкой магнетита до превращения в оолиты магнетитового состава.

Для выявления последовательности минеральных преобразований в рудах нами исследован минеральный состав слабоизмененных ксенолитов толеитовых базальтов в сравнении с их гематитизированными разновидностями, содержащимися в скарированной породе, и в виде реликтовых фрагментов в оруденелых вулканокластических породах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В карьере месторождения были отобраны образцы ксенолитсодержащих скарированных пород и оруденелых вулканокластитов (рис. 1б–г).

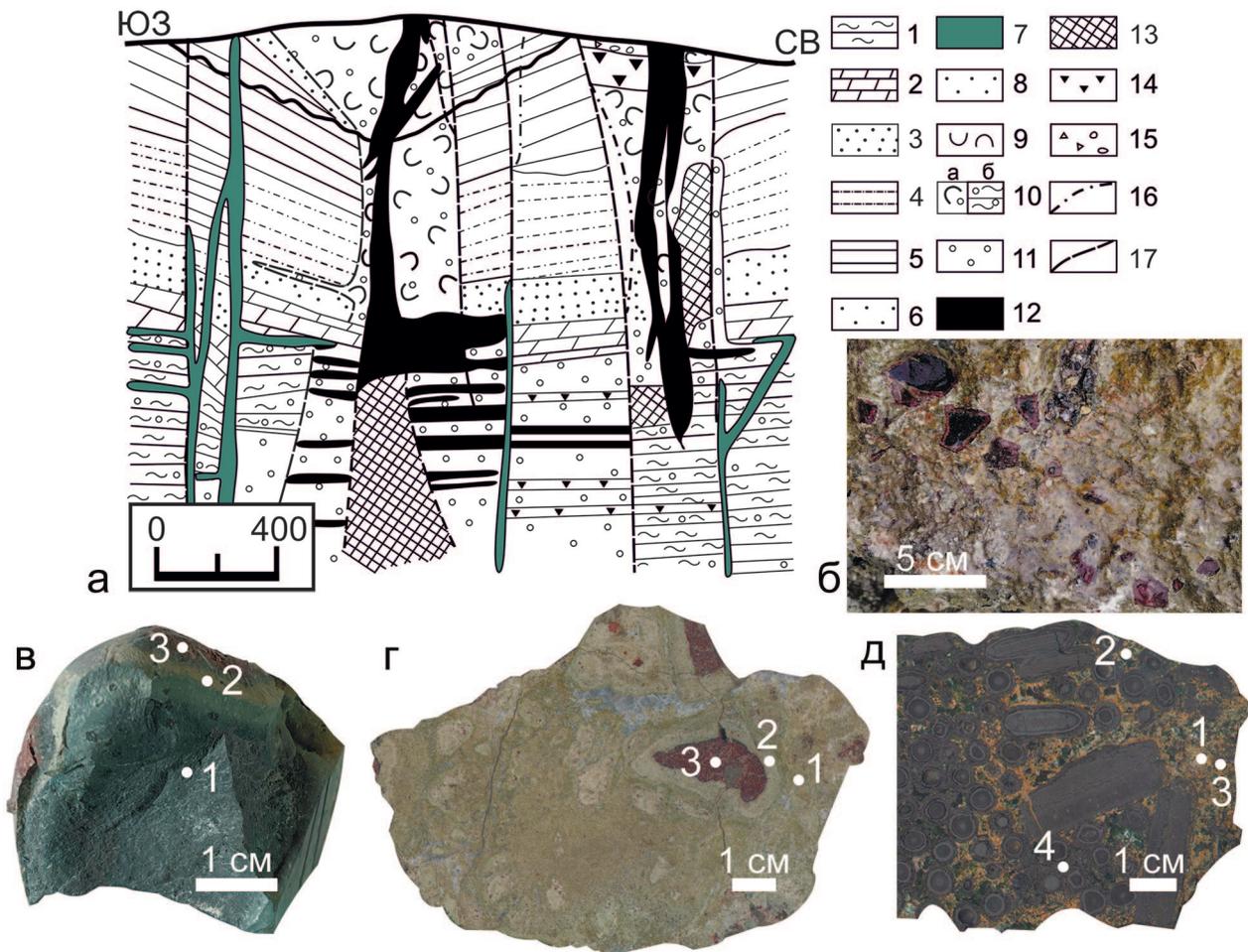


Рис. 1. Рудногорское месторождение.

а – разрез по разведочному профилю XI (Калугин и др., 1981). C_{2-3} : 1 – алевролиты; Q_1-O_3 : 2 – доломиты, 3 – кварцевые песчаники, 4 – аргиллиты, мергели; S_1 : 5 – аргиллиты, алевролиты, 6 – песчаники; $C-P_1$: 7 – долериты, 8 – песчаники, 9 – туфы с блоками осадочных пород, 10 – скарнированные туфы (а) и осадочные породы (б), 11 – скарны, 12, 13 – магнетитовая руда (12 – $Fe_{руд} > 25\%$, 13 – $Fe_{руд}$ 14–25%), 14 – карбонатные породы с вкрапленным магнетитом; Q : 15 – аллювий и делювий; 16 – эруптивный контакт; 17 – дизъюнктивные нарушения. б – ксеногенные включения в различной степени преобразованных базальтов в скарнированной породе (фото стенки карьера). Образцы пород: в – слабоизмененный ксенолит толеитового базальта в скарнированной породе; г – гематитизированные и скарнированные ксенолиты базальтов в скарнированной породе; д – оруденелая (магнетитизированная) вулканокластическая порода. 1–4 – точки отбора образцов для анализов XRD и ISP-MS.

Fig. 1. Rudnogorskoe deposit.

а – cross section according to the exploration profile XI (Kalugin et al., 1981). C_{2-3} : 1 – siltstones; Q_1-O_3 : 2 – dolomites, 3 – quartz sandstones, 4 – mudstones, marls; S_1 : 5 – mudstones, siltstones, 6 – sandstones; $C-P_1$: 7 – dolerites, 8 – sandstones, 9 – tuffs with blocks of sedimentary rocks, 10 – scarned tuffs (a) and sedimentary rocks (b), 11 – scarns, 12, 13 – magnetite ore (12 – $Fe_{ore} > 25\%$; 13 – Fe_{ore} 14–25%), 14 – carbonate rocks with disseminated magnetite; Q : 15 – alluvium and deluvium; 16 – eruptive contact; 17 – disjunctive disorders. б – xenoliths of basalt in skarned rock (photo of open pit mine wall). Rock samples: в – weakly altered xenolith of tholeiitic basalt in skarned rock; г – hematitized xenoliths of basalt in skarned rock; д – magnetitized to varying degrees volcanoclastite. 1–4 – sampling points for XRD and ICP-MS analyzes.

Минеральный состав образцов изучен с применением рентгеновского анализа в воздушно-сухом состоянии (дифрактометр SHIMADZU XRD-6000 и ДРОН-2.0), Си-анод, графитовый монохроматор, съемка в интервале углов $2\theta = 4-70^\circ$, шаг съемки 0.02° , аналитик П.В. Хворов). Пробы для анализов

были отобраны из различных пород и подготовлены путем истирания первично раздробленного материала в агатовой ступке до образования тонкого порошка. Количественное определение минерального состава выполнено методом постоянных коэффициентов в программе SIROQUANT V4. Опре-

деление минерального состава и морфоструктурных особенностей проводилось на микроскопе Olympus BX51 с использованием темнопольного изображения (Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН), Миасс).

Химический состав минералов изучен с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Tescan Vega 3 sbu с энергодисперсионным анализатором Oxford Instruments Xact (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, Миасс), аналитик М.А. Рассомахин. Пределы обнаружения содержаний химических элементов не превышают 0.2 мас. %. Воспроизводимость определений составляет от 1 до 15 отн. %.

ИК-спектры смектитов получены с помощью инфракрасного фурье-спектрометра Spectrum One с микроскопом MultiScor фирмы Perkin Elmer в режиме на отражение, усреднялись по 100 интерферограммам (аналитик С.В. Лепеха, ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН). Размер диафрагмы варьировал от 50 до 30 мкм. Все спектры были пересчитаны методом Крамерса – Кронига.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Образцы скарнированных пород светло-зеленого цвета пятнистой текстуры и обломочной структуры (рис. 1б). На фоне серо-зеленоватой однородной массы породы выделяются чуждые для породы крупные округловатые обломки (размер от нескольких миллиметров до 3–4 см) слабоизмененных толеитовых базальтов микропорфировой структуры темно-зеленого, почти до черного цвета (рис. 1в). Для этих обломков характерны чередующиеся к краям зоны шириной в 2–3 мм голубоватого и светло-молочного цвета, которые заключены в гематитизированную оторочку кирпично-красного цвета. Кроме того, в породе также присутствуют обломки кирпично-красного цвета с наружной каймой светло-серых тонов (рис. 1г). Размер таких обломков варьирует от первых миллиметров до 2–3 см. В одних случаях участки кирпично-красного цвета в центре обломков представляют точечные образования или небольшие разрозненные участки (до 5 мм), а в некоторых случаях их размер достигает 2–3 см, составляя большую часть обломков. Особенностью этих обломков являются реликтовые участки слабоизмененных базальтов темно-зеленого цвета в центральной части.

Оруденелые вулканокластические породы состоят из несортированных и в различной степени магнетитизированных вулканокластов, фрагментов скарнированных пород и слоистых магнетитовых руд, часто с наружной тонкослоистой магнетитовой оторочкой (рис. 1д). Обычно обломки слегка касаясь друг друга или не соприкасаясь погружены в неоднородную цементирующую массу.

Минеральный состав

В составе скарнированной породы определены: полевой шпат (28%), пироксен (24), смектит (22), гранат (10), кальцит (8), хлорит (2) и гематит (1%) (см. рис. 1г, точка 1). Основными породообразующими минералами ксенолита слабоизмененного толеитового базальта являются полевой шпат (39%), смектит (27) и пироксен (18), а также незначительно присутствуют кварц (7), хлорит (2) и магнетит (2%) (см. рис. 1в, точка 1). Цвет зон в краевых частях ксенолита обусловлен изменением количественных соотношений минералов. В зонах осветления ближе к краевой части ксенолита увеличиваются количества полевого шпата (49%), кварца (15) и соответственно уменьшаются содержания пироксена (15) и смектита (21%) (см. рис. 1в, точка 2). Наружная оторочка красного цвета состоит из калиевого полевого шпата (35%), гематита (8) и аморфной составляющей (до 57%), представленной плохо окристаллизованным смектитом (см. рис. 1в, точка 3).

Центральная часть ксенолитов кирпично-красного цвета характеризуется появлением в составе значительного количества эпидота (37%), кальцита (16), граната (15), гематита (до 3) при уменьшении содержаний смектита (13) и полевого шпата (11%) в 2 раза по сравнению с таковыми в основной массе скарнированной породы (см. рис. 1г, точка 3). Наружная оторочка ксенолитов выделяется резким возрастанием содержания полевого шпата (50%) и уменьшением содержания пироксена (14) на фоне близких количеств кальцита (11), граната (9) и смектита (16%) относительно основной массы породы (см. рис. 1г, точка 2).

Отобранные пробы цементирующей массы в оруденелых вулканокластических породах выделяются различной цветовой гаммой, представленной светло-желтыми, темно-зелеными, розоватыми и темно-серыми оттенками. Участки распространения цементирующего вещества темно-зеленого цвета характеризуются преобладанием в минеральном составе хлорита (94%) и присутствием незначительного количества пироксена (2), талька (2), кальцита (1) и магнетита (1%) (см. рис. 1д, точка 1). Участки цемента с розоватым оттенком отличаются повышенным содержанием аморфной составляющей – смектита (46%) (рис. 2) и присутствием хлорита (14), кальцита (12), талька (9), пироксена (9) и магнетита (4%) (см. рис. 1д, точка 2). В некоторых пробах отмечается присутствие смешаннослойной иллит-смектитовой фазы (6%) с базальным рефлексом $d = 3.22 \text{ \AA}$ на дифрактограммах. Цементирующая масса со светло-желтым оттенком представлена пироксеном (28%), кальцитом (27), хлоритом (18), магнетитом (17) и тальком (10%) (см. рис. 1д, точка 3). Магнетитизированные участки цемента кроме магнетита содержат хлорит, кальцит и апатит (см. рис. 1д, точка 4).

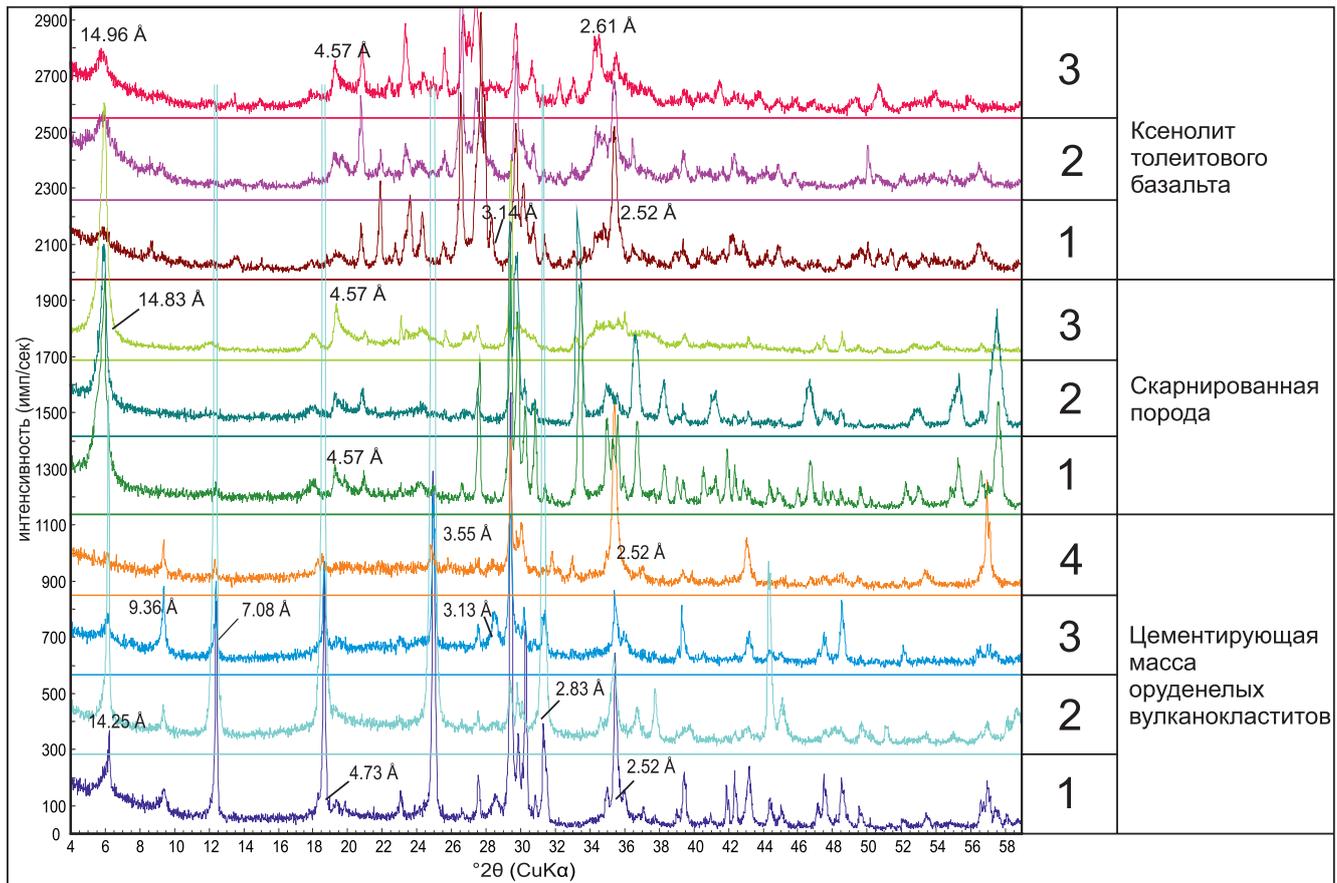


Рис. 2. Дифракционные картины образцов Рудногорского месторождения в воздушно-сухом состоянии. Точки отбора проб см. на рис. 1.

Fig. 2. Diffraction patterns for samples of the Rudnogorskoe deposit in the air-dry state. See the sampling points in Fig. 1.

На дифрактограммах проб смектитовая составляющая диагностируется по характерным сильным рефлексам, регистрируемым в области значений d_{001} , равных 14.76–15.23 Å, а также 4.57–4.59, 3.11–3.14 и 1.528–1.531 Å (см. рис. 2). Для хлорита изученных проб характерны сильные рефлексы в области 7.08–7.13 и 2.546–2.558 Å при низкой интенсивности в области 13.28–14.14 Å (см. рис. 2).

Петрографические исследования

Скарнированные породы характеризуются микроразнозернистой основной массой, состоящей из тонких сростаний смектита и хлорита, в которой выделяются зерна полевых шпатов, клинопироксена, эпидота и граната. Корродированные реликтовые зерна клинопироксена размером 100–200 мкм замещаются агрегатами карбоната и эпидота. Единичные зерна плагиоклаза размером от 70 до 200 мкм имеют таблитчатое строение. *Эпидот*

развит слабо и наблюдается в виде редких зерен размером не более 300 мкм. *Цоизит* встречается в виде единичных призматических и удлиненных зерен размером не более 100 мкм с аномальной интерференционной окраской (нейтрально-синие, серо-синие, желтовато-буроватые). *Гранаты* отмечаются в виде округлых зерен размером от 100 до 400 мкм. *Карбонаты* в основной массе породы представлены зернами изометричной формы, редко в виде ксеноморфных агрегатов с отчетливыми полисинтетическими двойниками. Вокруг карбонатов наблюдаются каемки мощностью 10 мкм глинисто-хлоритового состава. *Циркон* представлен отдельными угловатыми агрегатами размером до 100 мкм, а также как включение в эпидоте. Изредка встречается *кварц*, который заполняет промежутки в основной массе. *Апатит* размером до 100 мкм представлен удлиненными кристаллами призматической формы с поперечными трещинами.

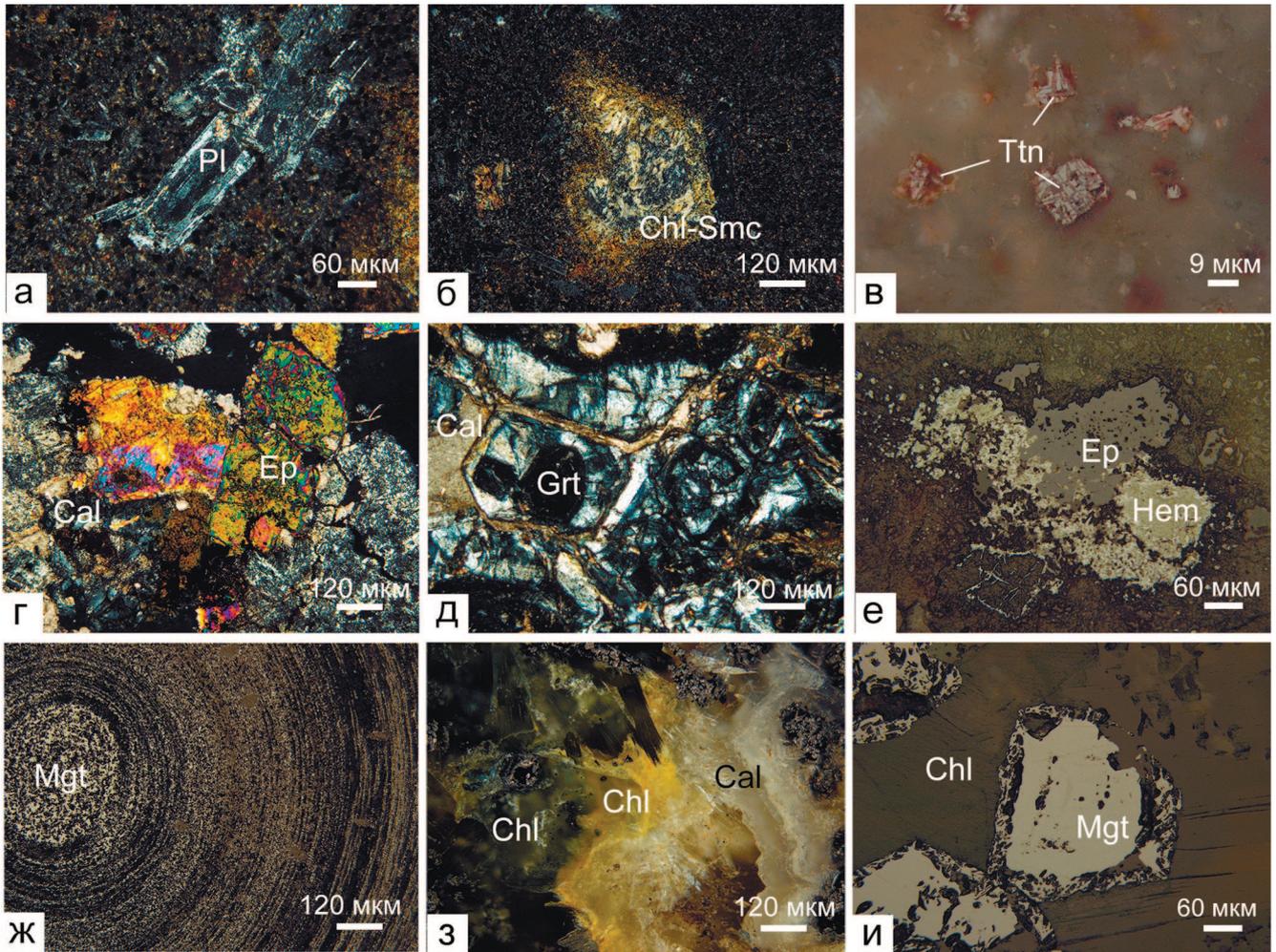


Рис. 3. Минеральный состав пород Рудногорского месторождения.

Ксенолит толеитового базальта: а – вкрапленник плагиоклаза (*Pl*) с полисинтетическими двойниками, б – миндалины, заполненные агрегатами хлорита-сметита (*Chl-Smc*), в – идиоморфные зерна титанита (*Ttn*); скарнированная порода: г – сростки призматических зерен эпидота (*Ep*), окруженные агрегатами кальцита (*Cal*), д – зерна граната (*Grt*) ромбического облика в кальцитовом цементе, е – пластинки гематита (*Hem*) вокруг агрегатов эпидота; оруденелый вулканокластит: ж – магнетитовый оолит (*Mgt*) с четким концентрически-зональным строением, з – пластинки хлорита в кальцитовом цементе, и – зональное зерно магнетита в хлоритовой массе. Поляризованный (а, б, г, д, з) и отраженный (в, е, ж, и) свет.

Fig. 3. Minerals of the rocks from Rudnogorskoe deposit.

Xenolith of tholeiitic basalt: а – plagioclase (*Pl*) phenocryst, б – amygdala, filled with chlorite-smectite aggregates (*Chl-Smc*), в – idiomorphic titanite (*Ttn*); skarned rock: г – clusters of prismatic epidote grains (*Ep*) surrounded by calcite aggregates (*Cal*), д – rhombic garnet grains (*Grt*) in calcite cement, е – plate hematite (*Hem*) around epidote aggregates (*Ep*); mineralized volcanoclastite: ж – concentric-zonal magnetite ooid (*Mgt*); з – chlorite flakes associated with calcite in cement; и – zonal grain of magnetite in chlorite mass. Polarized light (а, б, г, д, з) and reflected light (в, е, ж, и).

Ксенолит слабоизмененного толеитового базальта характеризуется наличием крупных вкрапленников полевых шпатов в основной массе интерсертальной структуры. Вкрапленники полевых шпатов (калиевые полевые шпаты и плагиоклазы) размером от 100 до 800 мкм представлены как кристаллами призматической и удлиненной форм, так и отдельными гломеровыми сростками с полисин-

тетическим или зональным погасанием, которые частично замещены агрегатами слюдястого минерала (серицита) и хлорита (рис. 3а). Миндалины диаметром до 0.5 мм частично или полностью выполнены радиально-лучистыми, пластинчатыми агрегатами хлорита и чешуйчатыми агрегатами смектита (рис. 3б). Основная масса состоит из хаотично расположенных лейст полевого шпа-

та размером до 50–60 мкм, промежутки между которыми заняты стеклом, замещенным агрегатами глинистых минералов. Реликтовые зерна и удлиненно-призматические кристаллы клинопироксена в основной массе замещены хлоритом. В наружной кайме ксенолита наблюдаются многочисленные пластинчатые зерна *гематита* (до 10–20 мкм). *Титанит* (от 10 до 200 мкм) хаотично распределен в виде многочисленных выделений, характеризующихся параллельно ориентированными и решетчатыми структурами (рис. 3в). В основной массе отмечается редкая вкрапленность магнетита.

Основная масса гематитизированного ксенолита в скарнированной породе сложена карбонатным материалом, в котором присутствуют крупные таблитчатые кристаллы эпидота (от 80 до 500 мкм по длинной оси) (рис. 3г), иногда в тесном срастании с *клиноцоизитом*. *Гранаты* наблюдаются в виде ромбических кристаллов со сглаженными вершинами (рис. 3д). В некоторых агрегатах граната фиксируется оптическая аномалия, выраженная в анизотропии минерала, характерная для андрадит-гроссулярового ряда, вследствие чего часть зерен отличается сложным концентрически зональным и секториальным строением, подчеркиваемым светло- и темно-серыми цветами интерференции. Кальцит по отношению к эпидоту и гранату ксеноморфен. Гематит в виде темно-бурых тонких пластинок размером до 100 мкм развивается вокруг агрегатов эпидота и циркона (рис. 3е). *Смектит* в ксенолите заполняет пространство между агрегатами кальцита и граната. Агрегаты *полевых шпатов* представляют собой реликтовые зерна, замещенные кальцитом и эпидотом.

Вулканокластические породы сложены в различной степени магнетитизированными обломками, вплоть до образования оолитов, имеющими концентрически зональное строение (рис. 3ж) и одиночными зональными зёрнами магнетита размером от 60 до 500 мкм в руде. В цементирующей массе присутствуют крупные пластинчатые агрегаты хлорита размером до 1–2 мм (рис. 3з, и) в ассоциации с кальцитом размером до 1 мм, часто содержащим включения апатита размером от 100 до 400 мкм. Выделяются локальные участки в межобломочном пространстве, где в хлоритовой массе содержатся зональные угловатые зерна магнетита.

Химический состав минералов

Полевые шпаты. Химический состав калиевых полевых шпатов в ксенолите слабоизмененного толеитового базальта (рис. 4а) варьирует от степени вторичных изменений, мас. %: SiO₂ – 56.19–65.89, Al₂O₃ – 17.73–22.99, K₂O – 13.01–16.34 с примесями Na₂O – 0.26–0.34, MgO – 0.92, CaO – 0.18, FeO – 0.54 и BaO – 0.60 (табл. 1). Химический состав плагиоклаза по содержаниям компонентов

близок к стехиометрическому, мас. %: SiO₂ – 55.95, Al₂O₃ – 26.53, CaO – 10.05, Na₂O – 5.96, K₂O – 0.33 и FeO – 0.81 (см. табл. 1). Химический состав остаточных зерен калиевых полевых шпатов в основной массе (рис. 4г) и гематитизированном ксенолите не отличается от состава таковых в ксенолите слабоизмененного толеитового базальта (см. табл. 1).

Клинопироксены. Химический состав клинопироксена в ксенолите толеитового базальта (рис. 4б) характеризуется пониженными содержаниями (мас. %): CaO – 11.74 и присутствием значительного количества Al₂O₃ – до 3.44, Na₂O – 0.41, K₂O – 0.22 (см. табл. 1). По составу клинопироксен в гематитизированном ксенолите соответствует кальциевому диопсиду, мас. %: SiO₂ – 54.11–54.48, CaO – 24.33–25.23, MgO – 14.99–16.33, содержащему примеси FeO – 3.33–5.30, Na₂O – до 0.77, Al₂O₃ – до 0.27, TiO₂ – до 0.31 (см. табл. 1).

Смектиты. В ксенолите слабоизмененного толеитового базальта повышенные содержания (мас. %) MgO (24.24–26.25) и SiO₂ (52.23–55.08) при низких содержаниях FeO (1.79–2.87) и Al₂O₃ (1.47–2.55) характерны для чешуйчатых агрегатов смектита-1 в цементе, расположенном между лейстами полевых шпатов (рис. 4в, табл. 2). Смектит-2, который псевдоморфно развивается по лейстам полевых шпатов, имеет пониженные содержания (мас. %) MgO (18.74–18.76), SiO₂ (41.46–42.32), FeO (1.70–1.72) и повышенные содержания Al₂O₃ (7.27–7.58) и CaO (2.51–2.81) по сравнению со смектитом-1 (рис. 4в, см. табл. 2). В смектите-2 повсеместно присутствует примесь K₂O (0.22–0.23 мас. %).

В гематитизированном ксенолите химический состав смектита-3 в основной массе характеризуется варьирующими содержаниями (мас. %) SiO₂ (41.73–48.57), MgO (23.28–24.91), CaO (1.39–3.24) и повышенными содержаниями Al₂O₃ (5.46–6.58) при низких содержаниях FeO (1.49–2.53) (рис. 4г). В наружной оторочке гематитизированного ксенолита плотная смектитовая масса с трещинами синерезиса (смектит-4) (рис. 5а) по химическому составу отличается от состава смектита-3 уменьшением содержания MgO до 16.93 мас. % и соответственно увеличением содержания Al₂O₃ до 9.72 и FeO до 3.19 мас. % (см. табл. 2).

Хлориты. Химический состав крупных пластинчатых агрегатов хлорита, образующегося по вкрапленникам полевых шпатов, в ксенолите слабоизмененного толеитового базальта соответствует Mg-разновидности, мас. %: MgO – 18.36–20.13, Al₂O₃ – 13.50–18.19, SiO₂ – 31.32–31.74, FeO – 2.68–4.92, содержит незначительные примеси K₂O (0.14–0.19 мас. %), V₂O₅ (0.17) и CaO (от 0.92 до 1.48 мас. %) (см. рис. 4а, табл. 2).

В цементе оруденелых вулканокластических пород для укрупненных пластинок хлорита (рис. 4ж) характерна широкая вариация химического

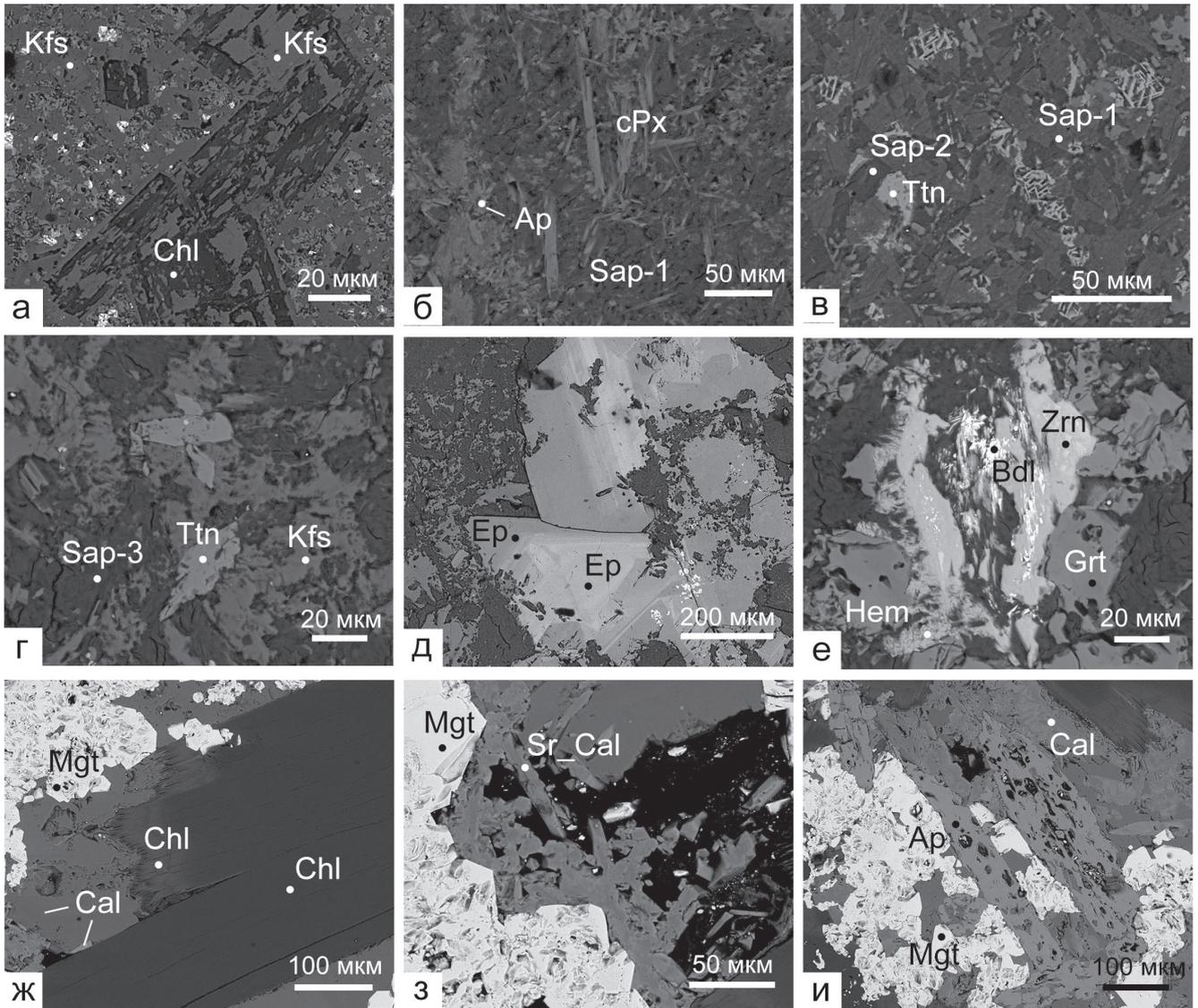


Рис. 4. Взаимоотношения минеральных ассоциаций в породах Рудногорского месторождения.

Ксенолит слабоизмененного толеитового базальта: а – развитие хлорита (*Chl*) по вкрапленникам калиевого полевого шпата (*Kfs*), б – игольчатые зерна клинопироксена (*cPx*) в смектитовой массе, в – две разновидности смектита-1 и -2 (*Sap-1* и *Sap-2*); скарированная порода: г – клиновидные агрегаты титанита (*Ttn*) в смектит (*Sap-3*)-полевошпатовой (*Kfs*) массе, д – зональные зерна эпидота (*Ep*), е – тесная ассоциация циркона (*Zrn*) и бадделеита (*Bdl*); цементующая масса оолитовой магнетитовой руды: ж – хлорит-кальцитовая (*Cal*) ассоциация в цементующей массе, з – образование кристаллов Sr-содержащего кальцита (*Sr-Cal*) в порах, и – корродированные зерна апатита (*Ap*) в ассоциации с кальцитом и магнетитом (*Mgt*) массы. Фото СЭМ.

Fig. 4. Relationships between mineral associations in rocks of Rudnogorskoe deposit.

Xenolith of slightly modified tholeiitic basalt: а – replacement of potassium feldspar phenocryst (*Kfs*) by chlorite (*Chl*), б – two varieties of smectite (*Sap-1* and *Sap-2*), в – clinopyroxene (*cPx*) in the smectite mass (*Sap-1*); scarred rock: г – wedge-shaped aggregates of titanite (*Ttn*) in smectite (*Sap-3*)-feldspar (*Kfs*) mass, д – zonal epidote grains (*Ep*), е – zircon (*Zrn*)-baddeleyite (*Bdl*) assemblage; cement mass of oolitic magnetite ore: ж – chlorite-calcite association in cementing mass, з – formation of crystals of Sr-containing calcite (*Sr-Cal*) in pores, и – corroded grains of apatite (*Ap*) in calcite-magnetite (*Mgt*) association. SEM-photo.

состава, мас. %: SiO_2 – 28.43–32.67, MgO – 25.47–35.34, Al_2O_3 – 18.69–21.11, FeO – 2.36–12.57. в сравнении с хлоритом в ксенолите толеитового базальта (см. табл. 2).

В титаните ксенолита толеитового базальта (см. рис. 3в) установлены примеси FeO (1.36–3.15 мас. %), иногда F (до 0.56) и V_2O_5 (до 0.89 мас. %). Для состава клиновидных агрегатов титанита в на-

Таблица 1. Химический состав минералов скарнированной породы, мас. %
Table 1. Chemical composition of minerals of the skarned rock of the Rudnorskoe deposit, wt. %

| SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | BaO | V ₂ O ₅ | La ₂ O ₃ | Ce ₂ O ₃ | Pr ₂ O ₃ | Nd ₂ O ₃ | Nb ₂ O ₅ | F | Сумма |
|---|------------------|--------------------------------|-------|------|-------|-------|-------------------|------------------|------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-------|
| Основная масса скарнированной породы | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Калиевый полевой шпат</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 63.84 | – | 19.35 | 0.40 | – | – | 0.25 | 0.43 | 14.01 | 1.19 | – | – | – | – | – | – | – | 99.48 |
| <i>Гранат</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 37.16 | – | 6.03 | 21.03 | – | – | 33.07 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 97.28 |
| 36.08 | – | 3.53 | 23.73 | – | 0.26 | 32.99 | – | – | – | 0.21 | – | – | – | – | – | – | 96.80 |
| 36.00 | – | 2.88 | 24.71 | – | 0.17 | 32.99 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 96.75 |
| 37.40 | – | 7.85 | 19.37 | – | 0.18 | 32.90 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 97.70 |
| 37.48 | 0.29 | 11.8 | 14.26 | – | 0.19 | 33.89 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 97.91 |
| 37.11 | – | 9.55 | 17.16 | – | 0.24 | 33.67 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 97.72 |
| 36.38 | – | 4.79 | 22.60 | – | 0.24 | 33.03 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 97.04 |
| 37.15 | 0.24 | 10.18 | 16.33 | 0.13 | 0.19 | 33.48 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 97.70 |
| $(\text{Ca}_{3.02-2.87}\text{Mg}_{0.03-0.02}\text{Mn}_{0.01}2.98-2.88(\text{Fe}_{1.87-0.62}\text{Al}_{1.4-0.19}\text{Ti}_{0.03-0.01}\text{V}_{0.02}2.21-2.01(\text{SiO}_4)_3$ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ксенолит слабоизмененного толеитового базальта | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Калиевый полевой шпат</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 64.55 | – | 18.67 | – | – | – | 0.18 | 0.26 | 15.75 | – | – | – | – | – | – | – | – | 99.41 |
| 56.19 | – | 22.99 | 0.54 | – | 0.92 | – | 0.34 | 13.01 | – | – | – | – | – | – | – | – | 94.0 |
| 65.12 | – | 18.23 | – | – | – | – | – | 16.06 | 0.60 | – | – | – | – | – | – | – | 100.0 |
| 65.89 | – | 17.73 | – | – | – | – | – | 16.07 | – | – | – | – | – | – | – | – | 99.70 |
| 65.78 | – | 17.74 | – | – | – | – | – | 16.34 | – | – | – | – | – | – | – | – | 99.87 |
| $(\text{K}_{0.97-0.81}\text{Na}_{0.03-0.02}\text{Ba}_{0.02}\text{Ca}_{0.01})_{0.97-0.93}(\text{Al}_{1.32-0.97}\text{Fe}_{0.02})_{1.34-1.32}\text{Si}_{2.74-3.07}\text{O}_8$ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Плагиоклаз</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 55.95 | – | 26.53 | 0.81 | – | – | 10.05 | 5.96 | 0.33 | – | – | – | – | – | – | – | – | 99.63 |
| $(\text{Na}_{0.52}\text{Ca}_{0.49}\text{K}_{0.02})_{1.03}(\text{Fe}_{0.03}\text{Al}_{1.41})_{1.44}\text{Si}_{2.53}\text{O}_8$ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Клинопироксен</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 50.81 | – | 3.44 | 7.21 | – | 20.12 | 11.74 | 0.41 | 0.22 | – | – | – | – | – | – | – | – | 93.95 |
| $\text{Mg}_{1.15}(\text{Ca}_{0.48}\text{Fe}_{0.23}\text{Al}_{0.16}\text{Na}_{0.03})_{0.9}\text{Si}_{1.94}\text{O}_6$ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Титанит</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 32.21 | 30.26 | 4.32 | 2.72 | – | 0.68 | 28.13 | – | 0.32 | – | 0.89 | – | – | – | – | – | 0.56 | 100.0 |
| 30.60 | 35.74 | 1.99 | 3.15 | – | – | 28.34 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 99.82 |
| 31.53 | 32.72 | 4.81 | 1.36 | – | – | 29.23 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 99.65 |
| $(\text{Ca}_{1-0.96}\text{Mg}_{0.03}\text{K}_{0.01})_{1.01-0.98}(\text{Ti}_{0.87-0.72}\text{Al}_{0.18-0.08}\text{Fe}_{0.09-0.04})_{1.03-0.96}\text{Si}_{1.02-0.99}\text{O}_5$ | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Таблица 1. Окончание
 Table 1. Ending

| SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | BaO | V ₂ O ₅ | La ₂ O ₃ | Ce ₂ O ₃ | Pr ₂ O ₃ | Nd ₂ O ₃ | Nb ₂ O ₅ | F | Сумма |
|--|------------------|--------------------------------|-------|-----|-------|-------|-------------------|------------------|------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---|-------|
| Гематитизированный ксенолит | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Центральная часть | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Калиевый полевой шпат</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 64.61 | – | 18.56 | – | – | – | – | 0.13 | 15.46 | 0.85 | – | – | – | – | – | – | – | 99.61 |
| 65.24 | – | 18.89 | – | – | – | – | – | 15.44 | – | – | – | – | – | – | – | – | 99.57 |
| 62.67 | – | 20.90 | – | – | – | – | 0.23 | 14.12 | 2.03 | – | – | – | – | – | – | – | 99.95 |
| (K _{0.92–0.23} Va _{0.07–0.03} Na _{0.04–0.01} Ca _{0.01}) _{0.96–0.93} (Al _{1.15–1.02} Fe _{0.02}) _{1.15–1.06} Si _{3.2–2.92} O ₈ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Эпидот</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 35.43 | – | 21.09 | 12.13 | – | 0.61 | 18.40 | – | – | – | – | 2.00 | 4.43 | 0.51 | 2.05 | – | – | 96.65 |
| 35.45 | – | 21.77 | 12.30 | – | 0.42 | 18.95 | – | – | – | – | 1.59 | 3.54 | 0.8 | 1.54 | – | – | 96.35 |
| 37.54 | – | 24.96 | 11.45 | – | – | 22.35 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 96.29 |
| 37.48 | – | 23.16 | 11.96 | – | 0.12 | 22.52 | – | – | – | – | – | 0.51 | – | – | – | – | 95.75 |
| 36.59 | – | 23.64 | 10.69 | – | 0.22 | 20.57 | – | – | – | – | 1.46 | 3.34 | – | – | – | – | 96.52 |
| [Ca _{1.93–1.67} (Ce _{0.14–0.01} La _{0.06–0.04} Nd _{0.06–0.05} Pr _{0.02}) _{0.28–0.01}] _{1.95–1.91} (Al, Fe) _{3.04–2.96} Si ₂ O ₇ SiO ₄ [O, OH] | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Гранат</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 38.07 | 0.84 | 13.47 | 11.28 | – | – | 34.82 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 98.49 |
| 38.77 | 0.80 | 15.22 | 9.51 | – | – | 34.80 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 99.10 |
| 37.90 | 0.30 | 14.46 | 10.92 | – | – | 35.04 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 98.62 |
| 38.04 | – | 15.86 | 9.55 | – | – | 35.24 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 98.68 |
| Ca _{2.95–2.92} (Fe _{0.75–0.62} Al _{1.4–1.26} Ti _{0.03–0.01}) _{2.07–2.03} (SiO ₄) ₃ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Наружная оторочка | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Калиевый полевой шпат</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 64.59 | – | 18.92 | 0.48 | – | 0.38 | 0.11 | – | 15.32 | – | – | – | – | – | – | – | – | 99.80 |
| 63.44 | – | 20.24 | 0.48 | – | – | 0.25 | 0.3 | 14.04 | 1.11 | – | – | – | – | – | – | – | 99.86 |
| <i>Клинопироксен</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 54.48 | 0.31 | 0.27 | 3.33 | – | 16.33 | 24.33 | 0.77 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 99.82 |
| 54.33 | – | – | 5.30 | – | 15.02 | 25.18 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 99.83 |
| 54.11 | – | – | 5.17 | – | 14.99 | 25.23 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 99.50 |
| Ca _{1–0.95} (Mg _{0.89–0.83} Fe _{0.16–0.1} Na _{0.05} Al _{0.01}) _{1.0–0.99} Si ₂ O ₆ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Титанит</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29.83 | 41.37 | 0.65 | 0.44 | – | – | 27.16 | – | – | – | – | – | – | – | – | 0.39 | – | 99.83 |
| 32.68 | 33.13 | 3.01 | 2.50 | – | 0.33 | 28.17 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 99.82 |
| 31.29 | 34.13 | 2.74 | 1.24 | – | 0.23 | 28.84 | – | 0.11 | – | 1.00 | – | – | – | – | – | – | 99.58 |
| (Ca _{0.99–0.96} Mg _{0.02–0.01} K _{0.01}) _{1.02–0.97} (Ti _{1.01–0.83} Al _{0.11–0.02} Fe _{0.07–0.01}) _{0.05–0.96} Si _{1.04–0.97} O ₅ | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Примечание. Кристаллохимические формулы рассчитаны на катионы: 8 – для эпидота и граната, 5 – для калиевого полевого шпата и плагиоклаза, 4 – для клинопироксена, 3 – для титанита. Проверк – не обнаружено.
 Note. Crystal chemical formulas calculated on cations: 8 – epidote and garnet, 5 – K-feldspar and plagioclase, 4 – clinopyroxene, 3 – titanite. Dash – not determined.

Таблица 2. Химический состав смектита и хлорита в ксенолитах скарнированной породы и цементе оруденелых вулканокластических пород Рудногорского месторождения, мас. %**Table 2.** Chemical composition of smectite and chlorite from xenoliths of scarned rocks and cement masses of volcanoclastites from the Rudnogorskoe deposit, wt. %

| № п/п | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | V ₂ O ₅ | SO ₃ | Сумма |
|--|------------------|------------------|--------------------------------|-------|-------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|-----------------|-------|
| Ксенолит слабоизмененного толеитового базальта | | | | | | | | | | | |
| <i>Смектит в основной массе</i> | | | | | | | | | | | |
| 1 | 52.52 | – | 2.55 | 2.87 | 24.24 | 1.94 | 0.41 | 0.38 | – | 0.44 | 85.34 |
| 2 | 53.70 | – | 2.07 | 1.79 | 26.25 | 1.09 | – | – | – | – | 84.90 |
| 3 | 55.08 | – | 1.47 | 1.87 | 26.21 | 0.28 | – | – | – | – | 84.90 |
| 4 | 52.23 | – | 1.66 | 2.12 | 24.91 | 1.13 | – | – | – | – | 82.05 |
| <i>Смектиты по лейстам полевых шпатов</i> | | | | | | | | | | | |
| 5 | 41.46 | 0.07 | 7.27 | 1.70 | 18.76 | 2.81 | – | 0.23 | 0.17 | – | 72.47 |
| 6 | 42.32 | – | 7.58 | 1.72 | 18.74 | 2.51 | – | 0.22 | – | – | 73.11 |
| $(\text{Na}_{0.007}\text{K}_{0.09-0.01}\text{Ca}_{0.26-0.04})_{0.28-0.02}(\text{Mg}_{2.43-2.90}\text{Fe}_{0.51-0.11}\text{Al}_{0.46-0.07})_{3.22-2.97}(\text{Si}_{2.63-4.03}\text{Al}_{1.37-0.02})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \times n\text{H}_2\text{O}$ | | | | | | | | | | | |
| <i>Хлорит</i> | | | | | | | | | | | |
| 7 | 31.32 | – | 13.50 | 4.92 | 20.13 | 1.48 | – | 0.14 | 0.17 | – | 71.67 |
| 8 | 31.74 | – | 18.19 | 2.68 | 18.36 | 0.92 | – | 0.19 | – | – | 72.09 |
| $(\text{Mg}_{3.61-3.26}\text{Al}_{2.34-1.68}\text{Fe}_{0.49-0.27}\text{Ca}_{0.2-0.12}\text{K}_{0.01}\text{V}_{0.01})_6(\text{Si}_{3.77-3.78}\text{Al}_{0.23-0.22})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ | | | | | | | | | | | |
| Гематитизированный ксенолит | | | | | | | | | | | |
| <i>Смектит</i> | | | | | | | | | | | |
| Центральная часть | | | | | | | | | | | |
| 9 | 45.40 | – | 6.14 | 1.94 | 24.08 | 2.51 | – | – | – | – | 80.07 |
| 10 | 42.75 | – | 6.48 | 1.56 | 24.36 | 3.24 | – | – | – | – | 78.39 |
| 11 | 44.37 | – | 6.58 | 2.53 | 24.57 | 1.39 | – | – | – | – | 79.43 |
| 12 | 41.73 | – | 5.46 | 1.94 | 23.28 | 1.97 | – | – | – | – | 74.39 |
| 13 | 48.57 | – | 5.50 | 1.49 | 24.91 | 1.89 | – | – | – | – | 82.36 |
| Наружная оторочка | | | | | | | | | | | |
| 14 | 45.49 | – | 7.01 | 3.19 | 21.66 | 1.88 | – | – | – | – | 79.23 |
| 15 | 46.70 | – | 9.72 | 2.85 | 16.93 | 2.07 | – | – | – | – | 78.28 |
| $\text{Ca}_{0.28-0.08}(\text{Mg}_{3.09-2.08}\text{Fe}_{0.21-0.10}\text{Al}_{0.79-0.03})_{3.1-3.07}(\text{Si}_{3.55-3.08}\text{Al}_{0.82-0.45})_{4-3.9}\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \times n\text{H}_2\text{O}$ | | | | | | | | | | | |
| Цемент оруденелых вулканокластитов | | | | | | | | | | | |
| <i>Хлорит</i> | | | | | | | | | | | |
| 16 | 32.08 | – | 18.72 | 2.60 | 34.82 | – | – | – | – | – | 88.22 |
| 17 | 28.43 | – | 21.11 | 12.57 | 25.47 | – | – | – | – | – | 87.57 |
| 18 | 32.67 | – | 19.29 | 2.29 | 35.34 | – | – | – | – | – | 89.58 |
| 19 | 32.19 | – | 18.82 | 2.36 | 34.55 | – | – | – | – | – | 87.91 |
| 20 | 28.66 | – | 20.84 | 10.27 | 27.19 | – | – | – | – | – | 86.95 |
| 21 | 29.78 | – | 19.41 | 9.03 | 28.90 | – | – | – | – | – | 87.11 |
| 22 | 30.15 | – | 18.69 | 12.34 | 25.94 | – | – | – | – | – | 87.12 |
| $(\text{Mg}_{4.8-3.73}\text{Al}_{1.23-1}\text{Fe}_{1.16-0.17})_6(\text{Si}_{2.98-2.79}\text{Al}_{1.21-1.02})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ | | | | | | | | | | | |

Примечание. Формула смектита рассчитана на 22 аниона, хлорита – на 10 катионов. Прочерк – не обнаружено.

Note. Calculation of smectite formula based on for 22 anions, chlorite – for 10 cations. Dash – not determined.

ружной оторочке гематитизированного ксенолита (см. рис. 4г) определены примеси, мас. %: Al₂O₃ – 0.65–3.01, MgO – 0.23–0.33, FeO – 0.44–3.15, K₂O – до 0.11.

Эпидот, присутствующий в гематитизированном ксенолите скарнированной породы, характеризуется зональным распределением РЗЭ: центральная часть зерен обогащена РЗЭ (0.51 до 8.99

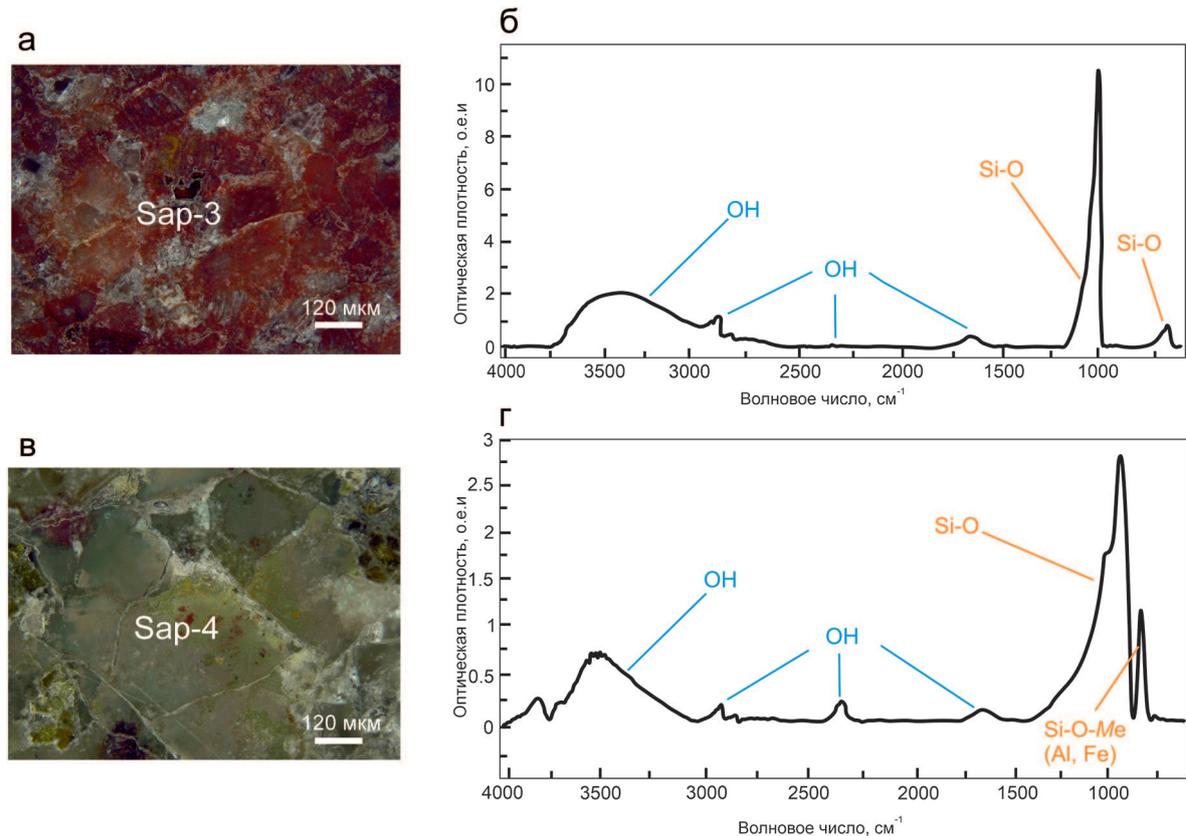


Рис. 5. Точки анализа и ИК-спектры смектитов в центральной гематитсодержащей части (а, б) и наружной оторочки (в, г) гематитизированного ксенолита из скарнированной породы. Рудногорское месторождение.

Fig. 5. Point of analyzes and IR spectra of smectites from the hematite bearing central part (а, б) and outer rim (в, г) of hematitized xenolith in skarn rock. Rudnogorskoe deposit.

мас. %), а в краевых частях зерен РЗЭ отсутствуют (рис. 4д, см. табл. 2).

Химический состав мелких зерен (до 20 мкм) граната в смектитовой массе скарнированной породы по составу близок к гидрогроссуляру, а крупные (до 300 мкм) зерна граната в гематитизированном ксенолите – к андрадиту (см. табл. 1).

Для тонкопластинчатых агрегатов гематита Fe_2O_3 (95.68 мас. %) в ксенолите скарнированной породы (рис. 4е) установлены примеси, мас. %: SiO_2 – 4.33, Al_2O_3 – 0.75, CaO – 0.6, MgO – 0.52, V_2O_5 – 0.44. С гематитом ассоциируют циркон (см. рис. 4е), мас. %: ZrO_2 – 40.7–66.0, SiO_2 – 23.9–33.3, Al_2O_3 – 0.45–0.81, MgO – 0.98, K_2O – 0.24–0.31, CaO – 0.17–8.33, FeO – 0.36–6.71, HfO_2 – 0.74–0.93, Y_2O_3 – 1.43–1.78, ThO_2 – 0.69–2.77, UO_2 – 0.17–3.51, а также бадделейт, мас. %: ZrO_2 – 96.5, FeO – 1.41, HfO_2 – 1.02, CaO – 0.25.

Кальцит в основной массе скарнированной породы содержит примеси FeO (0.28–0.37 мас. %) и MgO (до 0.1 мас. %). В цементирующей массе оолитовых руд для состава крупных кристаллов кальцита (см. рис. 4ж, з) характерны сильно варьирующие

содержания SrO (0.47–16.61 мас. %), а также примеси FeO (0.21–0.39) и MgO (0.17–3.76 мас. %).

В химическом составе апатита скарнированной породы отмечается присутствие SiO_2 – 0.37 мас. %, FeO – 0.23, F – 1.62, Cl – 0.26 мас. %. Апатит в цементирующей массе оруденелой вулканокластической породы (рис. 4и) характеризуется примесями следующими, мас. %: FeO – 0.28–0.61, SiO_2 – 0.10–0.43, F – 1.11–1.82, Cl – 0.20–0.37. Соотношение F/Cl в апатите изученных пород варьирует от 4.91 до 6.23.

ИК-спектры смектитов

ИК-спектры смектитов изучены из центральной (смектит-3) и наружной оторочки (смектит-4) гематитизированного ксенолита (см. рис. 1в).

Смектит-3 в гематитизированной массе ксенолита характеризуется резким пиком на отрезке 1016 см^{-1} , эталонным для смектитовых групп минералов (рис. 5а, б). Присутствие пика 670 см^{-1} отражает положение SiO_4 в структуре минерала. Появление интенсивности в пределах $2848\text{--}2933\text{ см}^{-1}$

и наличие пика 3394 см^{-1} указывают на вариации колебаний ОН-группы. Также просматриваются пики очень слабой интенсивности на отрезках 1656 и 2361 см^{-1} .

В ИК-спектрах смектита-4 из наружной оторочки гематитизированного ксенолита проявляются явные полосы поглощения в области валентных и деформационных колебаний Si-O с максимумами 870 и 970 см^{-1} , а также многочисленные полосы поглощения в области $3483\text{--}3562$ и 3818 см^{-1} , вероятно, отвечающие валентным колебаниям ОН-групп молекул воды и гидроксидов (рис. 5в, г). Пики слабой и средней интенсивности частоты – 1648 , 2826 и 2924 см^{-1} – принадлежат деформационным колебаниям кристаллизационной воды, а 2342 см^{-1} – соответствует физически адсорбированной воде на поверхности зерен минералов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Считается, что скарны на железорудных месторождениях Ангаро-Илимского относятся к автореактивному генетическому типу, поскольку формируются без контактного взаимодействия интрузий с карбонатными породами (Вахрушев, 1981; Мазуров и др., 2018). Несмотря на то что исходный материал изученных скарнированных пород в той или иной степени замещен гранатом, диопсидом, хлоритом и кальцитом, они по структуре распознаются как базальты, содержащие ксеногенный материал в различной степени преобразованных базальтов (см. рис. 1б). По текстурно-структурным признакам и минеральному составу ксенолиты сходны с автокластами брекчиевидных базальтов, известных в литературе под названием “туффизиты” (Никулин и др., 1991; Фон-дер-Флаасс, 1992; Фон-дер-Флаасс и др., 1992), однако в отличие от них встречаются в виде самостоятельных обломков, засоря исходный состав базальта.

Для изученных слабоизмененных ксенолитов характерна частично раскристаллизованная внутренняя зона (мезостазис заполнен едва раскристаллизованным стеклом), которая окаймляется стекловатой корочкой, содержащей скопления миндалин, выполненных смектитом и хлоритом. Из первичных минералов в них сохранились полевые шпаты и клинопироксен, слагающие порфиновые вкрапленники в интерсертальной основной массе, что свойственно микрозернистым долеритам. Появление значительного количества смектита в основной массе породы свидетельствует о разложении вулканического стекла, что характерно для низкотемпературных придонных процессов преобразования стекловатых базальтов с образованием палагонита, а затем в дальнейших процессах гальмиролиза и диагенеза в глинистые минералы и оксигидроксиды железа (Рудник, 1979; Stau-

digel, Hart, 1983; Дриц, Коссовская, 1990; Pichler et al., 1999). Наличие большого количества полевого шпата в ксенолите толеитового базальта согласуется с тем, что рудоносные базальты отличаются повышенной щелочностью ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ до 4 %) и близки по многим петрогеохимическим признакам базальтам субщелочной серии (Шарков, Цветков, 1987; Никулин и др., 1991; Альмухамедов и др., 1999).

Выявленная смектит-гематитовая ассоциация в гематитизированных ксенолитах в присутствии таких минералов, как эпидот, кальцит и водосодержащие гранаты, отражает, что толеитовые базальты были преобразованы в смектит-железооксидную массу до того, как порода подверглась процессам скарнирования. Вероятно, дальнейшие преобразования с удалением Si, Al и Mg из смектитизированного базальтового материала привели к образованию оксигидроксидов железа, а затем тонкодисперсных агрегатов гематита (Дриц, Коссовская, 1990). Следует отметить, что смектитовое ядро в обломках, окруженное скарновыми минералами, широко распространено в лавовых потоках (Никулин и др., 1991). Присутствие смектитов в основной скарнированной массе породы и наружной оторочке гематитизированных ксенолитов, отличающихся большей раскристаллизованностью по сравнению с смектитом ксенолитов толеитовых базальтов, а также обильного гидрогроссуляра, предполагает низкотемпературные условия метасоматических изменений исходных пород. В лабораторных экспериментах фаза, соответствующая гидрогроссуляру, образуется при $\sim 120^\circ\text{C}$ и с повышением температуры реакции превращается в гроссуляр (Fujita et al., 2002). Находки в породе таких минералов, как бадделейт и циркон, указывают на постмагматические преобразования базальтов при участии нейтральных и щелочных флюидов (Момджи и др., 1976). Источником циркония, вероятно, могла быть его изоморфная примесь в ильмените, извлеченная при метасоматических процессах.

Химический состав апатита с соотношениями F/Cl = от 4.91 до 6.23 в изученных образованиях коррелирует со значениями F/Cl в базальтах континентальных рифтовых зон и отличается от состава эксплозивно-интрузивных базальтов траппов, характеризующихся более высокими содержаниями Cl, чем F (Олейников и др., 1973; Рябов и др., 2018). Считается, что железорудные месторождения Восточной Сибири приурочены к периферии трапповых впадин-синеклиз, узлам пересечения разломов, унаследованных от докембрийских структур фундамента и проявившихся как участки внутриконтинентального рифтогенеза (Никулин и др., 1991). Такие же соотношения F/Cl установлены для апатитов из скарнов и магнетитовых руд Магнитогорского железорудного месторождения на Урале (Холоднов, Бушляков, 2002). Возможным источни-

ком летучих компонентов могли быть осадочные породы Сибирской платформы (Рябов и др., 2018).

Последовательность преобразования вулканокластов в магнетитовую массу хорошо прослеживается в частично оруденелых вулканокластических породах (Жук-Почекутов, 1986). В одних случаях в ядре обломков обнаружены смектит-гематитовые ассоциации, характерные для описанных ксенолитов толеитовых базальтов. В других – обломки вплоть до центральных частей полностью состоят из скарновых минералов. Во всех случаях отмечается развитие магнетита по нерудным обломкам. Кроме того, в цементирующей массе оруденелых вулканокластических пород присутствуют участки, сложенные смектитом. Эти данные согласуются с ранее высказанным представлением о том, что образование скарнов на месторождении, очевидно, было многостадийным процессом (Жук-Почекутов, 1986).

На дифрактограммах проб изученных образцов смектитовая составляющая ксенолитов слабоизмененных базальтов характеризуется широкими рефлексами (d_{001} 14.85–15.23 Å) и низкой интенсивностью из-за высокой дисперсности и низкой структурной упорядоченности. Сдвиг рефлекса в сторону увеличения значений d_{001} с хорошо выраженной интенсивностью наблюдается у смектитов в гематитизированных ксенолитах (d_{001} 14.76–14.83 Å) и цементирующей массы (d_{001} 14.04–14.30 Å) в оруденелых вулканокластических породах, вероятно, за счет их более упорядоченной структуры. Кроме того, появление в пробах смектита цементирующей массы интенсивных рефлексов хлорита предполагает присутствие смешаннослойных смектит-хлоритовых фаз.

Полученные результаты исследования минеральных преобразований в ксенолитах и образования оолитовых руд, сохраняющих в оолитах реликты фрагментов толеитовых базальтов, магнетитовых руд и скарнированных пород, свидетельствуют о многостадийности рудообразующих процессов. Вероятно, формирование магнетитовых оолитов происходило из коллоидных и метакolloидных фаз в результате реакционного взаимодействия пород траппового комплекса с химически активными карбонатно-соленосными и карбонатно-эвапоритовыми рассолами в активной гидродинамической обстановке. Влияние рассолов, газовых просачиваний и испарений на месторождении рассмотрены в работах (Вахрушев, 1981; Polozov et al., 2016; Мазуров и др., 2018).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для ксенолитов толеитовых базальтов в скарнированных породах характерны процессы разложения вулканического стекла с образованием палагонита и его превращением

в смектиты и оксигидроксиды железа, свойственные низкотемпературным водным процессам. Сохранность смектитовых агрегатов с более упорядоченной структурой в скарновой породе и гематитизированных ксенолитах в ассоциации со скарновыми минералами, в том числе присутствие гидросульфида, также свидетельствует о низкотемпературных метасоматических процессах преобразования исходных пород. Изменения характера минеральных ассоциаций в определенной последовательности с отложением магнетита в рудах, вероятно, объясняется процессами, протекающими в металлоносных рассолах с поступлением газов CH_4 и CO_2 в рифтогенных грабен-синклиналях в районах интрузий толеитовых базальтов (Дербигов, 1964; Рудницкий, Кузнецов, 2014).

Благодарности

Авторы выражают благодарность Е.В. Белогуб за консультацию, М.А. Рассомахину и П.В. Хворову за выполнение СЭМ и рентгеновских анализов, соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альмухамедов А.И., Медведев А.Я., Кирда Н.П. (1999) Сравнительный анализ геодинамики пермотриасового магматизма Восточной и Западной Сибири. *Геология и геофизика*, **40**(11), 1575-1587.
- Вахрушев В.А. (1981) Галит-магнетитовые руды Сибирской платформы. *Геология рудн. месторождений*, **6**, 100-104.
- Дербигов И.В. (1964) К проблеме генезиса железоскарновых месторождений Западной Сибири (о вулканогенно-осадочном генезисе некоторых месторождений Казской группы). *Тр. СНИИГГиМС*, **35**, 82-100.
- Дриц В.А., Коссовская А.Г. (1990) Глинистые минералы: смектиты, смешаннослойные образования. М.: Наука, 214 с.
- Жук-Почекутов К.А. (1986) Магнетитовые оолиты Рудногорского железорудного месторождения. *Геология рудн. месторождений*, **4**, 72-83.
- Калугин А.С., Калугина Т.С., Иванов В.И. (1981) Железорудные месторождения Сибири. Новосибирск: Наука, 238 с.
- Калугин И.А., Третьяков Г.А., Фон-дер-Флаасс Г.С. (1994) Происхождение железных руд в траппах: образование рудоносной диагренмы с корневой зоной взаимодействия между базальтовой магмой и эвапоритами. Новосибирск, ОИГГМ, 45 с.
- Мазуров М.П., Гришина С.Н., Титов А.Т., Шихова А.В. (2018) Эволюция рудно-метасоматических процессов в крупных скарновых железорудных месторождениях трапповой формации Сибирской платформы. *Петрология*, **26**(3), 265-281. <https://doi.org/10.7868/S0869590318030044>
- Малич Н.С., Миرونюк Е.П., Туганова Е.В. (1999) Геологическая карта Сибирской платформы и прилегающих территорий. М-б 1 : 1 500 000. СПб.: ВСЕГЕИ.
- Момджи Г.С., Архипенкова А.Я., Козлов В.Ф. (1976) Платформенная магномагнетитовая формация (на примере Ангарской железорудной провинции). М.:

- Недра, 171 с.
- Никулин В.И., Фон-дер-Флаас Г.С., Барышев А.С. (1991) Эксплозивно-вулканическая базальтоидная рудообразующая система (Ангарская железорудная провинция). *Геология рудн. месторождений*, **3**, 26-40.
- Олейников Б.В., Савинов В.Т., Погудина М.А. (1973) Основные типы трапповых интрузивов среднепалеозойской и верхнепалеозойской – нижнемезозойской трапповых формаций зоны сочленения Тунгусской и Вилуйской синеклиз. *Геология и геохимия базитов восточной части Сибирской платформы: сб. ст.* (Отв. ред. В.В. Ковальский, Б.В. Олейников). М.: Наука, 4-76.
- Рудник Г.Б. (1979) Эффузивные породы. *Геология океана. В 2 т. (Отв. ред. чл.-кор. АН СССР П.Л. Безруков). Т. 1. Осадкообразование и магматизм океана.* М.: Наука, 9-38.
- Рудницкий В.Ф., Кузнецов А.Ж. (2014) О способах отложения руд Естюнинского скарново-магнетитового месторождения на Среднем Урале. *Металлогения древних и современных океанов – 2014.* Миасс: ИИИи УрО РАН, 91-94.
- Рябов В.В., Симонов О.Н., Снисар С.Г. (2018) Фтор и хлор в апатитах, слюдах и амфиболах расслоенных трапповых интрузий Сибирской платформы. *Геология и геофизика*, **59**(4), 453-466.
- Соловьев С.Г. (2011) Железоокисно-золото-медные и родственные месторождения. М.: Научный мир, 2011, 472 с.
- Фон-дер-Флаас Г.С. (1992) Туффизиты субщелочных базальтоидов и их роль в формировании железоносных диатрем юга Сибирской платформы. *Изв. РАН. Сер. геол.*, **8**, 98-112.
- Фон-дер-Флаас Г.С., Пермяков А.А. Спешилов В.М. (1992) Рудиогорское магнетитовое месторождение магматизм, структура, рудоносность. *Геология рудн. месторождений*, **2**, 51-67.
- Холоднов В.В., Бушляков И.Н. (2002) Галогены в эндогенном рудообразовании. Екатеринбург: УрО РАН, 391 с.
- Шарков Е.В., Цветков А.А. (1987) Магматические серии областей активного перехода от континента к океану и проблемы происхождения исходных магм. *Петрология и геохимия островных дуг и окраинных морей.* (Отв. ред. О.А. Богатиков). М.: Наука, 263-277.
- Fujita S., Suzuki K., Shibasaki Y. (2002) The mild hydrothermal synthesis of hydrogrossular from coal ash. *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, **4**, 41-45. <https://doi.org/10.1007/s10163-001-0055-x>
- Neumann E.-R., Svensen H., Polozov A.G., Hammer Ø. (2017) Formation of Si-Al-Mg-Ca-rich zoned magnetite in an end-Permian phreatomagmatic pipe in the Tunguska Basin. East Siberia. *Miner. Dep.*, **52**, 1205-1222. <https://doi.org/10.1007/s00126-017-0717-9>
- Pichler T., Ridley W.I., Nelson E. (1999) Low-temperature changes in excavated volcanics of the Southern Chile ridge: additional information on the early stages of seabed weathering. *Mar. Geol.*, **159**, 155-177.
- Polozov A.G., Svensen H.H., Planke S., Grishina S.N., Frisstad K.E., Dougal J.A. (2016) The basalt pipes of the Tunguska Basin (Siberia, Russia): High temperature processes and volatile degassing into the end-Permian atmosphere. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **441**, 51-64.
- Staudigel H., Hart S.R. (1983) Alteration of basaltic glass: Mechanism and significance for the oceanic crust – sea-water budget. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **47**(3), 337-350.

REFERENCES

- Almukhamedov A.I., Medvedev A.Ya., Kirda N.P. (1999) Comparative analysis of geodynamics of Permian magmatism in Eastern and Western Siberia. *Geologiya i Geofizika*, **40**(11), 1575-1587. (In Russ.)
- Derbikov I.V. (1964) On the problem of the genesis of the iron-skarn deposits of Western Siberia (on the volcanogenic-sedimentary genesis of some deposits of the Kaz group). *Tr. SNIIGiMS*, **35**, 82-100. (In Russ.)
- Drits V.A., Kossovskaya A.G. (1990) Clay minerals: smectites, mixed-layer formations. Moscow, Nauka Publ., 214 p. (In Russ.)
- Fon-der-Flaas G.S. (1992) Tuффизиты of subalkaline basalts and their role in the formation of iron-bearing diatremes of the south of the Siberian platform. *Izv. RAN. Ser. geol.*, **8**, 98-112. (In Russ.)
- Fon-der-Flaas G.S., Permyakov A.A. Speshilov V.M. (1992) Rudiogorskoye magnetite deposit magmatism, structure, ore bearing capacity. *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **2**, 51-67). (In Russ.)
- Fujita S., Suzuki K., Shibasaki Y. (2002) The mild hydrothermal synthesis of hydrogrossular from coal ash. *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, **4**, 41-45. <https://doi.org/10.1007/s10163-001-0055-x>
- Kalugin A.S., Kalugina T.S., Ivanov V.I. (1981) Iron ore deposits of Siberia. Novosibirsk, Nauka Publ., 238 p. (In Russ.)
- Kalugin I.A., Tretyakov G.A., Fon-der-Flaas G.S. (1994) The origin of iron ores in traps: the formation of an ore-bearing diatreme with a root zone of interaction between basalt magma and evaporites. Novosibirsk, OIGGM, 45 p. (In Russ.)
- Kholodnov V.V., Bushlyakov I.N. (2002) Halogens in endogenous ore formation. Yekaterinburg, Uro RAN, 391 p. (In Russ.)
- Malitch N.S., Mironyuk E.P., Tuganova E.V. (1999) Geological map of the Siberian platform and adjacent territories. M-b 1 : 1 500 000. Saint Petersburg, VSEGEL. (In Russ.)
- Mazurov M.P., Grishina S.N., Titov A.T., Shikhova A.V. (2018) Evolution of ore-metasomatic processes in large scarn iron ore deposits of the trap formation of the Siberian platform. *Petrologiya*, **26**(3), 265-281. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0869590318030044>
- Momdzhi G.S., Arkhipenkova A.Ya., Kozlov V.F. (1976) The platform magnomagnetite formation (on the example of the Angara iron ore province). Moscow, Nedra Publ., 171 p. (In Russ.)
- Neumann E.-R., Svensen H., Polozov A.G., Hammer Ø. (2017) Formation of Si-Al-Mg-Ca-rich zoned magnetite in an end-Permian phreatomagmatic pipe in the Tunguska Basin. East Siberia. *Miner. Dep.*, **52**, 1205-1222. <https://doi.org/10.1007/s00126-017-0717-9>
- Nikulin V.I., Fon-der-Flaas G.S., Baryshev A.S. (1991) Explosive volcanic basaltoid ore-forming system (Angarsk iron ore province). *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **3**, 26-40. (In Russ.)
- Oleynikov B.V., Savinov V.T., Pogudina M.A. (1973) The main types of trap intrusions of the Middle Paleozoic and Upper Paleozoic – Lower Mesozoic trap formations of

- the junction zone of the Tunguska and Vilyui synclises. *Geology and geochemistry of the basites of the eastern part of the Siberian platform*. (Ed. by V.V. Koval'skii, B.V. Oleinikov). Moscow, Nauka Publ., 4-76. (In Russ.)
- Pichler T., Ridley W.I., Nelson E. (1999) Low-temperature changes in excavated volcanics of the Southern Chile ridge: additional information on the early stages of seabed weathering. *Mar. Geol.*, **159**, 155-177.
- Polozov A.G., Svensen H.H., Planke S., Grishina S.N., Frisstad K.E., Dougal J.A. (2016) The basalt pipes of the Tunguska Basin (Siberia, Russia): High temperature processes and volatile degassing into the end-Permian atmosphere. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **441**, 51-64.
- Rudnik G.B. (1979) Effusive rocks. *The geology of the ocean*. (Ed. by P.L. Bezrukov). Vol. 1. *Sedimentation and magmatism of the ocean*. Moscow. Nauka Publ., 9-38. (In Russ.)
- Rudnitsky V.F., Kuznetsov A.J. (2014) On the methods of ore deposition of the Estyuninsky skarnovo-magnetite deposit in the Middle Urals. *Metallogeny of ancient and modern oceans – 2014*. Miass, IMin UrO RAN, 91-94. (In Russ.)
- Ryabov V.V., Simonov O.N., Snisar S.G. (2018) Fluorine and chlorine in apatites, micas and amphiboles of stratified trap intrusions of the Siberian platform. *Geologiya i Geofizika*, **59**(4), 453-466.
- Sharkov E.V., Tsvetkov A.A. (1987) Magmatic series of regions of active transition from the continent to the ocean and problems of the origin of the initial magmas. *Petrology and Geochemistry of island arcs and marginal seas*. (Ed. by O.A. Bogatikov). Moscow, Nauka Publ., 263-277. (In Russ.)
- Soloviev S.G. (2011) Iron oxide-gold-copper and related deposits. Moscow, Nauchnyi mir, 472 p. (In Russ.)
- Staudigel H., Hart S.R. (1983) Alteration of basaltic glass: Mechanism and significance for the oceanic crust – seawater budget. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **47**(3), 337-350.
- Vakhrushev V.A. (1981) Halite-magnetite ores of the Siberian platform. *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **6**, 100-104. (In Russ.)
- Zhuk-Pochekutov K.A. (1986) Magnetite oolites of the Rudnogorsk iron ore deposit. *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **4**, 72-83. (In Russ.)