



## Гротит из сланцев Иртышской зоны смятия (Восточный Казахстан)

Е. В. Наставко, Г. А. Федосюк, Б. Ю. Змеев

Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия  
evnastavko@yandex.ru, germanfedosyuk1002@gmail.com, zmeev200366@gmail.com

В сланцах Иртышской зоны смятия (Восточный Казахстан) обнаружен и изучен гротит — редкая фторглиноземистая разновидность титанита. Состав минералов получен при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Tescan Vega3. Нетипичные для титанита содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и F позволили отнести его к Al-F-титаниту (гротиту). Кроме глинозема и фтора в изученном гротите присутствуют FeO и  $\text{Y}_2\text{O}_3$ . Общая формула минерала имеет следующий вид:  $(\text{Ca}_{0.94-1.02}\text{Y}_{0.02-0.04}\text{Fe}_{0.01-0.02})\Sigma_{0.99-1.04}(\text{Ti}_{0.83-0.89}\text{Al}_{0.11-0.16})\Sigma_{0.94-1.02}(\text{Si}_{0.95-0.99}\text{Al}_{0.01-0.05})\Sigma_{1.00}\text{O}_4(\text{O}_{0.86-0.91}\text{F}_{0.09-0.14})\Sigma_{1.00}$ .

Максимальные содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и F характерны для центральных частей крупных зерен гротита из мусковит-биотитовых сланцев, а минимальные — для мелких зерен гротита из биотитовых сланцев, что, по всей видимости, отражает более низкие параметры давления при образовании последних. Минеральный состав сланцев и низкие содержания глинозема в гротите могут указывать на возможность его кристаллизации в породах зеленосланцевой фации.

**Ключевые слова:** гротит, сланцы, метаморфизм, Восточный Казахстан, Иртышская зона смятия

## Grothite from schists of the Irtysh Shear Zone (East Kazakhstan)

E. V. Nastavko, G. A. Fedosyuk, B. Yu. Zmeev

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

Grothite, a rare fluorine-alumina variety of titanite, was found and studied in the shales of the Irtysh shear zone (Eastern Kazakhstan). The mineral composition was defined Tescan Vega3 scanning electron microscope (SEM). The  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and F contents, which are not typical for titanite, allowed classifying it as Al-F titanite (grothite). In addition to alumina and fluorine, the studied grothite contains FeO and  $\text{Y}_2\text{O}_3$ . The general formula of the mineral is as follows:  $(\text{Ca}_{0.94-1.02}\text{Y}_{0.02-0.04}\text{Fe}_{0.01-0.02})\Sigma_{0.99-1.04}(\text{Ti}_{0.83-0.89}\text{Al}_{0.11-0.16})\Sigma_{0.94-1.02}(\text{Si}_{0.95-0.99}\text{Al}_{0.01-0.05})\Sigma_{1.00}\text{O}_4(\text{O}_{0.86-0.91}\text{F}_{0.09-0.14})\Sigma_{1.00}$ .

The maximum contents of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and F are characteristic of the central parts of large grains of grothite from muscovite-biotite schists, and the minimum for small grains of grothite from biotite schists, which, apparently, reflects lower pressure parameters during the formation of the latter. The mineral composition of the shales and the low alumina contents in the grothite may indicate the possibility of its crystallization in the rocks of the greenschist facies.

**Keywords:** grothite, schists, metamorphism, Eastern Kazakhstan, Irtysh Shear Zone

### Введение

Титанит на сегодняшний день является одним из наиболее информативных акцессорных минералов, который может служить как для геотермобарометрии (Hayden et al., 2008) так и для радиоизотопного датирования (Frost et al., 2001), которое приобретает все большую популярность (Балтыбаев, 2024; Кориш и др., 2024; Скублов и др., 2021 и др.).

Гротитом называют богатую глиноземом, железом и фтором разновидность титанита с формулой  $(\text{Ca}, \text{REE})(\text{Ti}, \text{Al}, \text{Fe})\text{SiO}_4(\text{O}, \text{OH}, \text{F})$ . Кристаллизация богатой алюминием и фтором разновидности титанита возможна в широком диапазоне температур и давлений. Высокоглиноземистые титаниты ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  — до 14 мас. %), содержащие фтор (до 2.5 мас. %), типичны для эклогитов, доломитов и мраморов Австрии (Castelli et al., 2002; Franz et al., 1985). Долгое время считалось, что основным фактором появления гротита в минеральном парагенезисе является давление в диапазоне 18–22 кбар (Franz et al., 1985). Именно высокие давления способствуют вхождению алюминия в структуру титанита.

Однако кроме давления нахождение глиноземистого титанита в явно невысокobarических породах может определяться составом породы и флюидной фазы (Markl et al., 1999). В последние годы обнаружен высокоглиноземистый гротит ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 7.9–12.7 мас. %) в рудах Березитового золотополиметаллического месторождения Верхнего Приамурья, которое имеет средние РТ-параметры образования. Появление гротита с таким содержанием глинозема авторы связывают с повышенной активностью фтора минералообразующей среды (Вах и др., 2009). Образование гротита в гранат-слюдистых сланцах шихтинской свиты Срединнокамчатского массива происходило в условиях низких давлений и температуры зеленосланцевой фации метаморфизма (Тарарин и др., 2011).

Несмотря на хорошую изученность гротита в высокobarических породах, работы по его детальному изучению в образованиях коллизионных зон, мilonитах и бластомилонитах метаморфических пород отсутствуют. Иртышская зона смятия (ИЗС) является хорошо известным объектом, где широко развиты по-

добные образования, нахождение и изучение в них гротита позволит расширить наши представления о диапазоне условий его кристаллизации.

### Геологическое строение района

Район исследования расположен в центральной части Иртышской зоны смятия, или Иртышской сдвиговой зоны, которая на юго-западе разделена глубин-

ными разломами от Калба-Нарымского пояса, а на северо-востоке — от Рудно-Алтайского пояса (рис. 1, а). Существуют разные точки зрения на природу метаморфических пород ИЗС. Считается, что они имеют палеозойский возраст и сформировались за счет метаморфизма осадков Калба-Нарымской зоны (Савинский, 2017)\*. Согласно другой точке зрения (Беспав и др., 1997; Ермолов, 2013; Ермолов и др., 2018), породы ИЗС трактуются как выход на поверхность до-

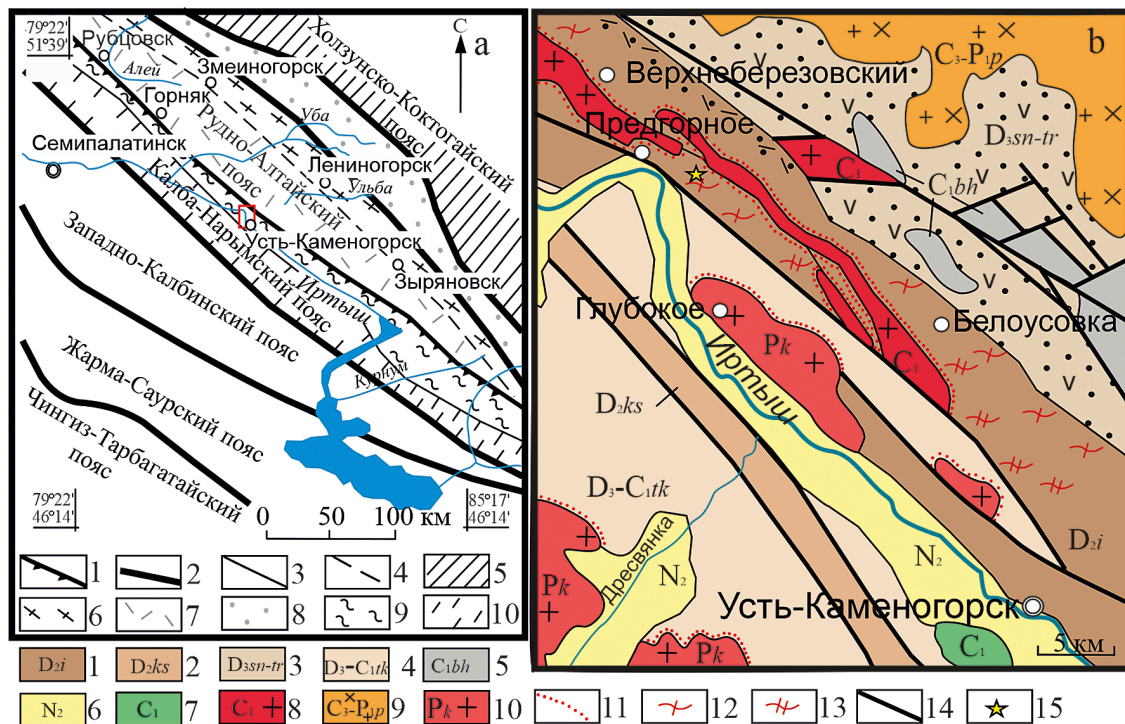


Рис. 1. Схема размещения рудных поясов Большого Алтая (а) (по: Беспав и др., 1997):

1 — Иртыш-Маркакольский глубинный разлом; 2—4 — границы металлогенических поясов (2), зон (3) и подзон (4); 5—12 — металлогенические зоны и подзоны: 5 — Холзунско-Шуйско-Сихихская зона; 6, 7 — Рудно-алтайская зона (6 — Лениногорско-Зырянская, 7 — Алейская), 8 — Белоубинско-Сарымсактинская зона, 9 — Иртышская зона, 10 — Калба-Нарымская зона. Красным прямоугольником выделен район работ.

Строение района исследований (b) (Геологическая..., 2019):

1 — иртышский метаморфический комплекс ( $D_2i$ ), 2 — зеленокаменные песчаники и алевролиты кыстав-курчумской свиты ( $D_2ks$ ), 3 — вулканогенные породы пестрого состава, сланцы, песчаники и известняки объединенных снегиревской, пихтовской, тарханской свит, 4 — сланцы, алевролиты, алевропесчаники такырской серии ( $D_3-C_1tk$ ), 5 — известняки, известково-глинистые сланцы и известковистые песчаники бухтарминской свиты ( $C_1bh$ ), 6 — красноцветная кора выветривания; 7—10: магматические комплексы: 7, 8 — прииртышская серия: 7 — габбро, 8 — граниты; 9 — субщелочные гранодиориты и граниты прииртышского комплекса ( $C_3-P_1p$ ), 10 — калбинский гранитный комплекс ( $P_k$ ); 11 — контактовые роговики, 12, 13 — породы регионального метаморфизма: 12 — породы фации зеленых сланцев, 13 — амфиболитовой фации; 14 — тектонические контакты, 15 — место отбора образца

Fig. 1. — Scheme of distribution of ore belts of the Great Altai (a) according to Bespaev et al., 1997:

1 — Irtysh-Markakol deep fault; 2—4 — boundaries of metallogenic belts (2), zones (3) and subzones (4); 5—12 — metallogenic zones and subzones: 5 — Kholzun-Shuya-Sitsikhe zone; 6—7 — Rudno-Altai zone (6 — Leninogorsko-Zyryanovskaya, 7 — Aleyskaya), 8 — Beloubinsko-Sarymsaktinskaya zone, 9 — Irtyshskaya zone, 10 — Kalba-Narymskaya zone. The red rectangle indicates the area of work.

Structure of the research area (b) (Geological..., 2019) — structure of the study area:

1 — Irtysh metamorphic complex ( $D_2i$ ), 2 — greenstone sandstones and siltstones of the Kystav-Kurchum Formation ( $D_2ks$ ), 3 — volcanogenic rocks of variegated composition, shales, sandstones and limestones of the combined Snegirevskaya, Pikhtovskaya, Tarkhanskaya Formation, 4 — shales, siltstones, silty sandstones of the Takyr series, 5 — limestones, calcareous-clayey shales and calcareous sandstones Bukhtarminskaya Formation, 6 — red-colored weathering crust; 7—10: igneous complexes: 7, 8 Irtysh series: 7 — gabbro, 8 — granites; 9 — subalkaline granodiorites and granites of the Priirtysh complex ( $C_3-P_1p$ ), 10 — Kalbinsky granite complex ( $P_k$ ); 11 — contact hornfels, 12, 13 — rocks of regional metamorphism: 12 — greenschist facies, 13 — amphibolite facies; 14 — tectonic contacts, 15 — sampling site

\* Савинский И. А. Метаморфические комплексы НТ/МТ-типа северо-западной части Иртышской зоны смятия (Восточный Казахстан): специальность 25.00.04 «Петрология, вулканология»: Автореф. ... дис. канд. геол.-мин. наук. Новосибирск, 2017. 22 с.

Savinsky I. A. Metamorphic HT/MT complexes of the type of the northwestern part of the Irtysh Shear Zone (Eastern Kazakhstan): specialty 25.00.04 Petrology, volcanology, abstract of PhD diss. Novosibirsk: 2017, 22 p. (in Russian)



кембрийских пород кристаллического фундамента Калба-Нарымской структурно-фациальной зоны.

Основная часть ИЗС (93–95 %) сложена регионально-метаморфизованными высокотемпературными породами низких давлений. Оставшаяся часть представлена узкими линейными зонами высокобарических метаморфических пород, природа которых трактуется как результат коллизионно-сдвиговых деформаций при столкновении Алтайской и Казахстано-Джунгарской литосферных плит (Савинский, 2017)\*.

Свыше 90 % Иртышской зоны смятия занимают нижнедевонские отложения ( $D_2ef$ ), представленные меланжево-динамометаморфическими образованиями иртышского комплекса ( $D_2i$ ). Степень метаморфизма варьирует от зеленосланцевой до гранулитовой фации. Высокометаморфизованные породы заключены в матрикс зеленых сланцев в присутствии и при возможном термальном воздействии габброидных интрузий (Савинский, 2017)\*. Петрографический состав комплекса характеризуется преимущественным развитием серицит-хлоритовых, кварц-серицитовых (до кварц-мусковитовых), слюдистых и слюдисто-кварцевых сланцев. В меньшей степени встречаются биотитовые и двуслюдяные гнейсы (плаггиогнейсы), амфиболиты и кристаллические ставролит-кианитовые (340–320 млн лет), гранат-силлиманитовые (320–310 млн лет) и андалузит-силлиманитовые (310–280 млн лет) сланцы (Савинский, 2017)\*. Породы иртышского комплекса прорваны раннекаменноугольными гранитами прииртышской серии ( $C_1p$ ).

Отложения Калба-Нарымского террейна, развитые в западной, юго-западной и южной частях района исследований, в меньшей степени представлены живетскими ( $D_2gv$ ) отложениями кыстав-курчумской ( $D_2ks$ ) свиты, а также нижнедевонскими-раннекаменноугольными отложениями такырской ( $D_3-C_1tk$ ) свиты.

В составе кыстав-курчумской ( $D_2ks$ ) свиты преобладают переслаивающиеся серые, темно-серые до черных известковистые, известковисто-глинистые, тонкослоистые углеродисто-глинистые метаалевролиты и сланцы, зеленые хлорит-серицитовые сланцы, редко отмечаются прослои и пачки слабоизвестковистых метапесчаников. Породы свиты неравномерно метаморфизованы в пределах зеленосланцевой фации метаморфизма, интенсивно рассланцованы, местами превращены в милониты. Возраст свиты обосновывается находками в ее отложениях фауны живетского возраста (табуляты, ругозы) (Навозов и др., 2011).

Такырскую ( $D_3-C_1tk$ ) серию слагают тонко- и мелкопереслаивающиеся (слоистость горизонтальная) черные, темно-серые, серые, реже зеленовато-серые глинистые алевролиты, глинистые и углеродисто-глинистые сланцы, изредка прослои полевошпатово-кварцевых алевропесчаников. Породы обычно интенсивно рассланцованы, местами превращены в филлитовидные углеродисто-кварцево-слюдистые сланцы и милониты.

Возраст отложений такырской серии фаунистически не обоснован и оценивается на основе палинологических анализов и геологических взаимоотношений с фаунистически охарактеризованными свитами. Отложения серии прорваны калбинскими гранитным комплексом ( $Pk$ ), сложенным порфиоровидными биотитовыми гранитами. Гранитоиды Калбинского бато-

лита отнесены к постколлизийным, а их возраст составляет 310–280 млн лет (Хромых и др., 2016).

На контакте калбинского комплекса и пород такырской серии развиты биотитовые роговики.

Отложения Рудно-Алтайского пояса развиты в северо-восточной части площади и сложены породами фаменского ( $D_3fm$ ) яруса, в исследуемом районе они представлены вулканогенными отложениями пестрого состава, сланцами, песчаниками и известняками объединенных снегиревской, пихтовской, тарханской свит ( $D_3sn÷tr$ ). На породы тарханской свиты согласно налегают отложения турнейского яруса ( $C_1t_2$ ), представленные бухтарминской свитой ( $C_1bh$ ), которая сложена серыми и темно-серыми известковистыми, редко углистыми алевролитами, известняками с прослоями песчаников. Далее на северо-восток отложения фаменского яруса прорваны породами прииртышского комплекса ( $C_3-P_1p$ ), в составе которого выделены три фазы внедрения: первая фаза представлена габброидами, диоритами, кварцевыми диоритами и диоритогнейсами, вторая — гранодиоритами, тоналитами, плаггиогритами и плаггиогранитогнейсами, а к третьей фазе отнесены граниты и гранитогнейсы.

### Объект и методы исследований

Объектом исследований являются биотитовые и мусковит-биотитовые сланцы ИЗС. Коренные выходы сланцев протяженностью 110–120 м и мощностью до 1.0–1.5 м северо-западного простирания обнажаются на восточной окраине поселка Предгорное Восточно-Казахстанской области (рис. 1, б). Отбор образцов проводился через 15–20 метров. Общее количество образцов — 8, из них 5 — мусковит-биотитовые и 3 — биотитовые сланцы.

В пределах ИЗС состав и уровень метаморфизма сменяется в северо-восточном направлении. В исследуемом районе полные разрезы от кианитовых до зеленых сланцев присутствуют на западной окраине поселка Предгорное, где высокометаморфизованные породы заключены в матрикс зеленых сланцев. В месте отбора образцов обнажаются только биотитовые и мусковит-биотитовые сланцы.

Основное макроскопическое отличие заключается в интенсивности цвета: биотитовые сланцы — темные, зеленовато-серо-коричневые; мусковит-биотитовые — более светлые, зеленовато-серо-коричневые.

Во всех образцах сланцев обнаружен гротит, в биотитовых сланцах это единичные зерна, в мусковит-биотитовых — до 1–2 %. В биотитовых сланцах это небольшие зерна размером до 0.05 мм, в мусковит-биотитовых сланцах наряду с мелкими зернами такого же размера присутствуют более крупные зерна размером 0.15–0.25 мм. В целом проанализирован состав 44 зерен (59 определений): в биотитовых сланцах — 17 (17 анализов), в мусковит-биотитовых — 27 (42 анализа).

Химический состав минералов изучался в полированных шлифах на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Tescan Vega3 с приставкой рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализа (ЭДС) Oxford Instruments (АНО «Развитие человеческого капитала» при ИОК «Техноград», Москва). Ускоряющее напряжение для СЭМ-съемки и анализа составило 20 кВ, предел обнаружения элементов — 0.1 %.

Последующие кристаллохимические пересчеты гротита выполнялись зарядным методом по разработанной методике (Oberti et al., 1991). Для получения коэффициента корреляции между содержанием различных элементов было выполнено построение корреляционной матрицы в программе Excel по 52 анализам. При высокой и весьма высокой корреляции установление ее достоверности оценивалось при помощи *t*-критерия и уровня значимости *p*.

### Минералого-петрографическая характеристика пород

Метаморфизованные породы ИЗС представлены биотитовыми и мусковит-биотитовыми сланцами. Выше упоминалось, что основное макроскопическое отличие пород заключается в интенсивности их цвета, что выражается в разном процентном соотношении светлой и темной слюды. Минеральный состав и структурно-текстурные особенности пород приведены на рис. 2.

**Биотитовые сланцы** макроскопически темные, зеленоватые, серо-коричневые, равномернозернистые породы со сланцеватой текстурой. Микроструктура пород гомеобластовая, гранолепидобластовая (рис. 2, а). Минеральный состав пород достаточно устойчив. Основная масса породы состоит из биотита (40–50 %), кварца (35–45 %) и плагиоклаза (5 %). Аксессуары суммарно составляют до 5 % и представлены апатитом, гротитом и цирконом. Вторичные изменения проявлены в незначительном развитии хлорита (5 %) по биотиту.

Темноцветные минералы представлены биотитом и хлоритом. Размер чешуек биотита достигает 0.1, реже 0.15 мм. Хлорит развивается по биотиту, собственных чешуек не образует. Кварц представлен изометричными зернами размером не более 0.05 мм, редко достигая 0.15–0.20 мм. Иногда мелкие зерна кварца слагают скопления размером до 2–3 мм. Плагиоклаз представлен субизометричными зернами альбита размером 0.05–0.1 мм.

**Мусковит-биотитовые сланцы** макроскопически светлые, зеленоватые, серо-коричневые, равномерно-

зернистые. Текстура сланцеватая. Микроструктура пород гомеобластовая, гранолепидобластовая (рис. 2, б). Минеральный состав пород достаточно устойчив. Породы сложены кварцем (30–40 %), биотитом (25–35 %), мусковитом (15–20 %) и плагиоклазом (5 %). Аксессуары суммарно составляют около 5 %, представлены апатитом (1–2 %), гротитом (1–2 %), ильменитом и цирконом. Из вторичных минералов присутствует хлорит (5 %), развивающийся по биотиту.

Темноцветные минералы представлены биотитом и хлоритом. Размер чешуек биотита достигает 0.1, реже 0.2 мм, мусковита — 0.1 мм. Хлорит развивается по биотиту, собственных чешуек не образует. Кварц представлен изометричными зернами размером не более 0.05 мм, редко 0.20–0.25 мм. Часто кварц слагает скопления размером 2–3 мм из мелких зерен. Мусковит совместно с биотитом образует скопления, размер чешуек не превышает 0.15 мм. Плагиоклаз представлен субизометричными зернами альбита размером 0.05–0.1 мм.

Сланцеватая текстура пород и наличие угловатых скоплений кварца, состоящих из мелких зерен (по всей видимости, реликтовые зерна протолита), являются признаками деформации.

Парагенезис биотитовых сланцев: биотит — кварц — альбит — хлорит — и мусковит-биотитовых сланцев: биотит — кварц — альбит — хлорит — серицит (мусковит) — типоморфен породам, претерпевшим метаморфизм зеленосланцевой фации.

Гротит представлен идиоморфными зернами размером от 0.05 до 0.20 мм (рис. 3). Располагается гротит как в кварц-слюдяной массе, так и на границе кварц-слюдяной основной массы и скоплений зерен кварца.

Отсутствие граната в исследованных образцах не позволило рассчитать РТ-параметры образования сланцев. По всей видимости, это связано с тем, что парагенезисы с гранатом  $Q - Ab - Chl - Ms - Grt$  встречаются только в породах из приконтактной с силлиманитовыми гнейсами зоны, а РТ-параметры их образования составили 544–548 °С и 2.3–3.5 кбар, и их вряд ли можно отнести к области зеленосланцевого мета-

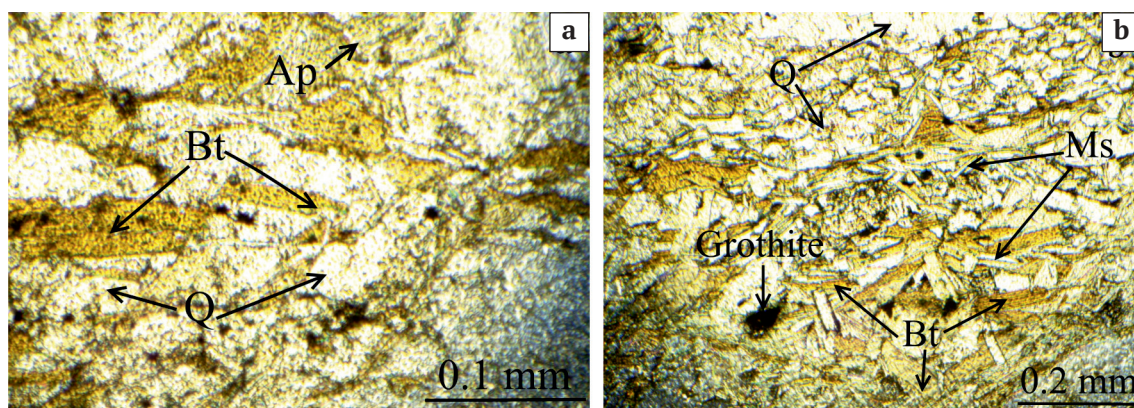
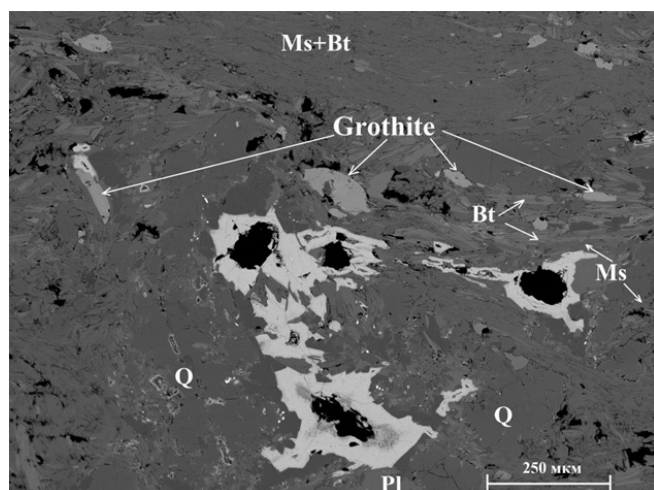


Рис. 2. Петрографические особенности биотитовых (а) и мусковит-биотитовых (б) сланцев (без анализатора).

Условные обозначения здесь и далее по тексту приводятся по Whitney, Evans, 2010: Bt — биотит, grothite — гротит, Ms — мусковит, Q — кварц

Fig. 2. Petrographic features of biotite (a) and muscovite-biotite (b) schists (without analyzer).

The symbols used here and throughout the text are given according to Whitney, Evans, 2010: Bt — biotite, grothite — grothite, Ms — muscovite, Q — quartz



**Рис. 3.** BSE-изображение гротита в мусковит-биотитовом сланце

Условные обозначения: Bt — биотит, Ms — мусковит, Pl — плагиоклаз, Q — кварц

**Fig. 3.** BSE images of grothite in muscovite-biotite schists  
Legend: Bt — biotite, Ms — muscovite, Pl — plagioclase, Q — quartz

морфизма. Авторы исследований связывают их с процессами локального прогрева (ороговикования) при внедрении интрузивных комплексов (Савинский, 2017)\*.

### Обсуждение результатов

Сводный химический состав гротита по 59 определениям приведен в таблице 1.

В крупных зернах состав определялся в центральной и краевой частях. Содержание  $Al_2O_3$ , F, а также  $FeO$  и  $Y_2O_3$  в гротите снижается от центральных частей крупных зерен к краевым в мусковит-биотитовых сланцах.

Для центральных частей крупных зерен гротита из мусковит-биотитовых сланцев характерны максимальные содержания глинозема (3.9–5.2 мас. %), иттрия (1.5–2.3 мас. %), железа (0.4–0.9 мас. %) и фтора (1.3–1.3 мас. %). Состав краевых частей зерен и мелких зерен схож и от центральных частей отличается пониженными содержаниями глинозема (3.6–4.8 мас. %), иттрия (1.3–1.6 мас. %), железа (0.3–0.7 мас. %) и фтора (1.1–1.2 мас. %). Для гротита из биотитовых сланцев характерны еще более низкие содержания глинозема (3.6–4.1 мас. %) и фтора (1.0–1.1 мас. %).

Учитывая значительное количество определений химического состава гротита, в таблице 2 приводятся только крайние значения, а также кристаллохимические формулы. Общая формула гротита из сланцев Иртышской зоны смятия имеет следующий вид:  $(Ca_{0.94-1.02}Y_{0.02-0.04}Fe_{0.01-0.02})\Sigma_{0.99-1.04}(Ti_{0.83-0.89}Al_{0.11-0.16})\Sigma_{0.94-1.02}(Si_{0.95-0.99}Al_{0.01-0.05})\Sigma_{1.00}O_4(O_{0.86-0.91}F_{0.09-0.14})\Sigma_{1.00}$ .

Корреляционная матрица (табл. 3) демонстрирует высокую и весьма высокую корреляцию между рядом элементов и их суммами. Весьма высокая корреляция связи обнаружена между суммарным содержанием оксидов кальция и титана и суммой оксида иттрия и глинозема, что согласуется со схемой изоморфизма  $Ca^{2+}+Ti^{4+} \leftrightarrow [легкие PЗЭ, Y]+Al^{VI}, Fe^{3+}$  (Russell et al., 1994). Коэффициент корреляции составляет –0.97 (рис. 4).

Положительная корреляция установлена между следующими парами:  $Al_2O_3 - FeO$ ,  $Al_2O_3 - F$ , суммой глинозема и иттрия с фтором и железом ( $r = 0.84-0.95$ ). Отрицательная корреляция установлена между суммарным содержанием кальция и титана с глиноземом, иттрием, железом и фтором ( $r = -0.85 \dots -0.93$ ). Во всех случаях корреляционная связь является сильной, статистически значимой. Корреляционные зависимости показаны на рис. 5.

**Таблица 1.** Средний состав и вариации химического состава гротита (мас. %)  
**Table 1.** Average composition and variations of chemical composition of grothite (wt.%)

| Элемент<br>Element | Биотитовые сланцы<br>Biotite schists | Мусковит-биотитовые сланцы<br>Muscovite-biotite schists |             |             |
|--------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------|-------------|
|                    | мелкие зерна<br>small grains (17)    | мелкие зерна<br>small grains (12)                       | к (15)      | с (15)      |
| $SiO_2$            | 29.4 – 30.2                          | 29.3 – 30.1                                             | 29.3 – 29.8 | 29.1 – 29.6 |
|                    | 29.7                                 | 29.7                                                    | 29.6        | 29.4        |
| $TiO_2$            | 35.0 – 36.3                          | 34.1 – 36.1                                             | 34.2 – 36.2 | 34.1 – 36.0 |
|                    | 35.8                                 | 35.5                                                    | 35.4        | 35.14       |
| $Al_2O_3$          | 3.6 – 4.1                            | 3.6 – 4.8                                               | 3.7 – 4.7   | 3.9 – 5.2   |
|                    | 3.8                                  | 4.0                                                     | 4.0         | 4.6         |
| $Y_2O_3$           | 1.3 – 1.6                            | 1.3 – 1.6                                               | 1.4 – 1.6   | 1.5 – 2.3   |
|                    | 1.5                                  | 1.5                                                     | 1.5         | 2.1         |
| $FeO$              | 0.3 – 0.6                            | 0.3 – 0.7                                               | 0.3 – 0.6   | 0.4 – 0.9   |
|                    | 0.4                                  | 0.4                                                     | 0.4         | 0.7         |
| $CaO$              | 27.0 – 28.7                          | 27.2 – 28.7                                             | 27.3 – 28.7 | 26.2 – 27.2 |
|                    | 27.8                                 | 27.8                                                    | 27.9        | 27.7        |
| $F$                | 1.0 – 1.1                            | 1.1 – 1.2                                               | 1.1 – 1.2   | 1.3 – 1.5   |
|                    | 1.1                                  | 1.1                                                     | 1.2         | 1.4         |

Примечание: с — центр зерна, к — край зерна.

Note: с — grain center, к — grain edge.



Таблица 2. Химический состав гротита (мас. %)

Table 2. Chemical composition of grothite (wt.%)

| № образца<br>Sample No.        | G1                                                                              | G2   | G5                                                          | G7   | G5                           |      | G7   |      |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------|-------------------------------------------------------------|------|------------------------------|------|------|------|
| Элемент<br>Element             | Мелкие зерна<br>в однослюдяных сланцах<br>Fine grains in single mica<br>schists |      | Зерна из двуслюдяных сланцев / Grains from two-mica schists |      |                              |      |      |      |
|                                |                                                                                 |      | мелкие зерна<br>fine grains                                 |      | крупные зерна / large grains |      |      |      |
|                                |                                                                                 |      |                                                             |      | с                            | к    | с    | к    |
| SiO <sub>2</sub>               | 30.1                                                                            | 29.4 | 30.1                                                        | 29.3 | 29.4                         | 29.7 | 29.3 | 29.3 |
| TiO <sub>2</sub>               | 36.2                                                                            | 35.2 | 36.1                                                        | 34.1 | 35.8                         | 36.2 | 34.1 | 34.2 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.6                                                                             | 4.1  | 3.6                                                         | 4.1  | 3.8                          | 3.7  | 5.2  | 4.7  |
| Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 1.6                                                                             | 1.3  | 1.6                                                         | 1.3  | 2.3                          | 1.6  | 2.2  | 1.4  |
| FeO                            | 0.5                                                                             | 0.5  | 0.3                                                         | 0.7  | 0.4                          | 0.3  | 0.9  | 0.6  |
| CaO                            | 27.0                                                                            | 28.5 | 27.2                                                        | 29.3 | 27.0                         | 27.4 | 26.9 | 28.6 |
| F                              | 1.0                                                                             | 1.1  | 1.1                                                         | 1.2  | 1.3                          | 1.1  | 1.4  | 1.2  |
| O=F                            | -0.4                                                                            | -0.5 | -0.5                                                        | -0.5 | -0.5                         | -0.5 | -0.6 | -0.5 |
| Сумма<br>Total                 | 99.6                                                                            | 99.5 | 99.5                                                        | 99.5 | 99.5                         | 99.5 | 99.4 | 99.5 |

Формулы рассчитаны методом по зарядам / The formulas are calculated using the charge method:

1.  $(\text{Ca}_{0.95}\text{Y}_{0.03}\text{Fe}_{0.01})_{\Sigma 0.99}(\text{Ti}_{0.89}\text{Al}_{0.13})_{\Sigma 1.02}(\text{Si}_{0.99}\text{Al}_{0.01})_{\Sigma 1.00}\text{O}_4(\text{O}_{0.91}\text{F}_{0.09})_{\Sigma 1.00}$
2.  $(\text{Ca}_{0.99}\text{Y}_{0.02}\text{Fe}_{0.01})_{\Sigma 1.02}(\text{Ti}_{0.86}\text{Al}_{0.12})_{\Sigma 0.98}(\text{Si}_{0.96}\text{Al}_{0.04})_{\Sigma 1.00}\text{O}_4(\text{O}_{0.90}\text{F}_{0.10})_{\Sigma 1.00}$
3.  $(\text{Ca}_{0.95}\text{Y}_{0.03}\text{Fe}_{0.01})_{\Sigma 0.99}(\text{Ti}_{0.89}\text{Al}_{0.12})_{\Sigma 1.01}(\text{Si}_{0.98}\text{Al}_{0.02})_{\Sigma 1.00}\text{O}_4(\text{O}_{0.90}\text{F}_{0.10})_{\Sigma 1.00}$
4.  $(\text{Ca}_{1.02}\text{Y}_{0.02}\text{Fe}_{0.02})_{\Sigma 1.05}(\text{Ti}_{0.83}\text{Al}_{0.11})_{\Sigma 0.94}(\text{Si}_{0.95}\text{Al}_{0.05})_{\Sigma 1.00}\text{O}_4(\text{O}_{0.89}\text{F}_{0.11})_{\Sigma 1.00}$
5.  $(\text{Ca}_{0.95}\text{Y}_{0.04}\text{Fe}_{0.01})_{\Sigma 1.00}(\text{Ti}_{0.89}\text{Al}_{0.12})_{\Sigma 1.01}(\text{Si}_{0.97}\text{Al}_{0.03})_{\Sigma 1.00}\text{O}_4(\text{O}_{0.88}\text{F}_{0.12})_{\Sigma 1.00}$
6.  $(\text{Ca}_{0.96}\text{Y}_{0.03}\text{Fe}_{0.01})_{\Sigma 1.00}(\text{Ti}_{0.89}\text{Al}_{0.11})_{\Sigma 1.00}(\text{Si}_{0.97}\text{Al}_{0.03})_{\Sigma 1.00}\text{O}_4(\text{O}_{0.89}\text{F}_{0.10})_{\Sigma 1.00}$
7.  $(\text{Ca}_{0.94}\text{Y}_{0.04}\text{Fe}_{0.02})_{\Sigma 1.00}(\text{Ti}_{0.84}\text{Al}_{0.16})_{\Sigma 1.00}(\text{Si}_{0.96}\text{Al}_{0.04})_{\Sigma 1.00}\text{O}_4(\text{O}_{0.87}\text{F}_{0.13})_{\Sigma 1.00}$
8.  $(\text{Ca}_{1.00}\text{Y}_{0.02}\text{Fe}_{0.02})_{\Sigma 1.04}(\text{Ti}_{0.83}\text{Al}_{0.13})_{\Sigma 0.96}(\text{Si}_{0.95}\text{Al}_{0.05})_{\Sigma 1.00}\text{O}_4(\text{O}_{0.89}\text{F}_{0.11})_{\Sigma 1.00}$

Примечание: с — центр зерна, к — край зерна.

Note: с — grain center, к — grain edge.

Таблица 3. Корреляционная матрица состава гротита

Table 3. Correlation matrix of grothite composition

| Элементы<br>Element                                            | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO          | CaO   | F            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO + TiO <sub>2</sub> |
|----------------------------------------------------------------|------------------|------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------|-------|--------------|----------------------------------------------------------------|------------------------|
| SiO <sub>2</sub>                                               | 1                |                  |                                |                               |              |       |              |                                                                |                        |
| TiO <sub>2</sub>                                               | 0.67             | 1                |                                |                               |              |       |              |                                                                |                        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                 | <b>-0.79</b>     | -0.72            | 1                              |                               |              |       |              |                                                                |                        |
| Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                  | -0.21            | -0.11            | 0.51                           | 1                             |              |       |              |                                                                |                        |
| FeO                                                            | -0.64            | -0.73            | <b>0.86</b>                    | 0.54                          | 1.00         |       |              |                                                                |                        |
| CaO                                                            | -0.07            | -0.35            | -0.28                          | <b>-0.82</b>                  | -0.27        | 1     |              |                                                                |                        |
| F                                                              | -0.63            | -0.50            | <b>0.86</b>                    | <b>0.79</b>                   | <b>0.77</b>  | -0.55 | 1            |                                                                |                        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -0.65            | -0.55            | <b>0.93</b>                    | <b>0.80</b>                   | <b>0.84</b>  | -0.56 | <b>0.95</b>  | 1                                                              |                        |
| CaO + TiO <sub>2</sub>                                         | 0.49             | 0.50             | <b>-0.86</b>                   | <b>-0.85</b>                  | <b>-0.85</b> | 0.63  | <b>-0.93</b> | <b>-0.97</b>                                                   | 1                      |

Примечание: жирным выделены коэффициенты корреляции (выше 0.75) между содержаниями тех компонентов, у которых высокая и очень высокая корреляция.

Note: Correlation coefficients (above 0.75) between the contents of those components with high and very high correlation are marked in bold.

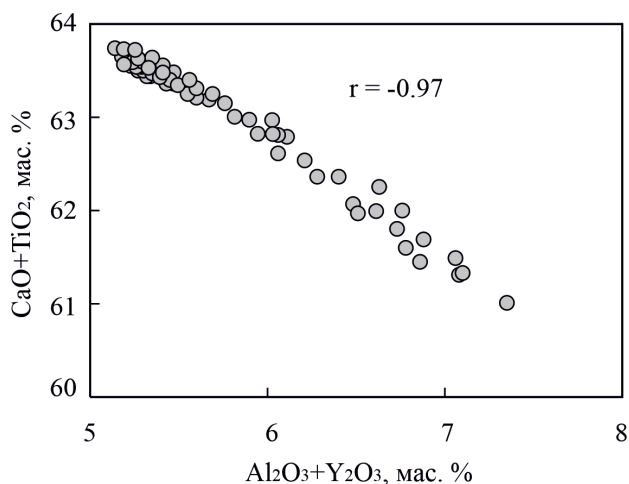
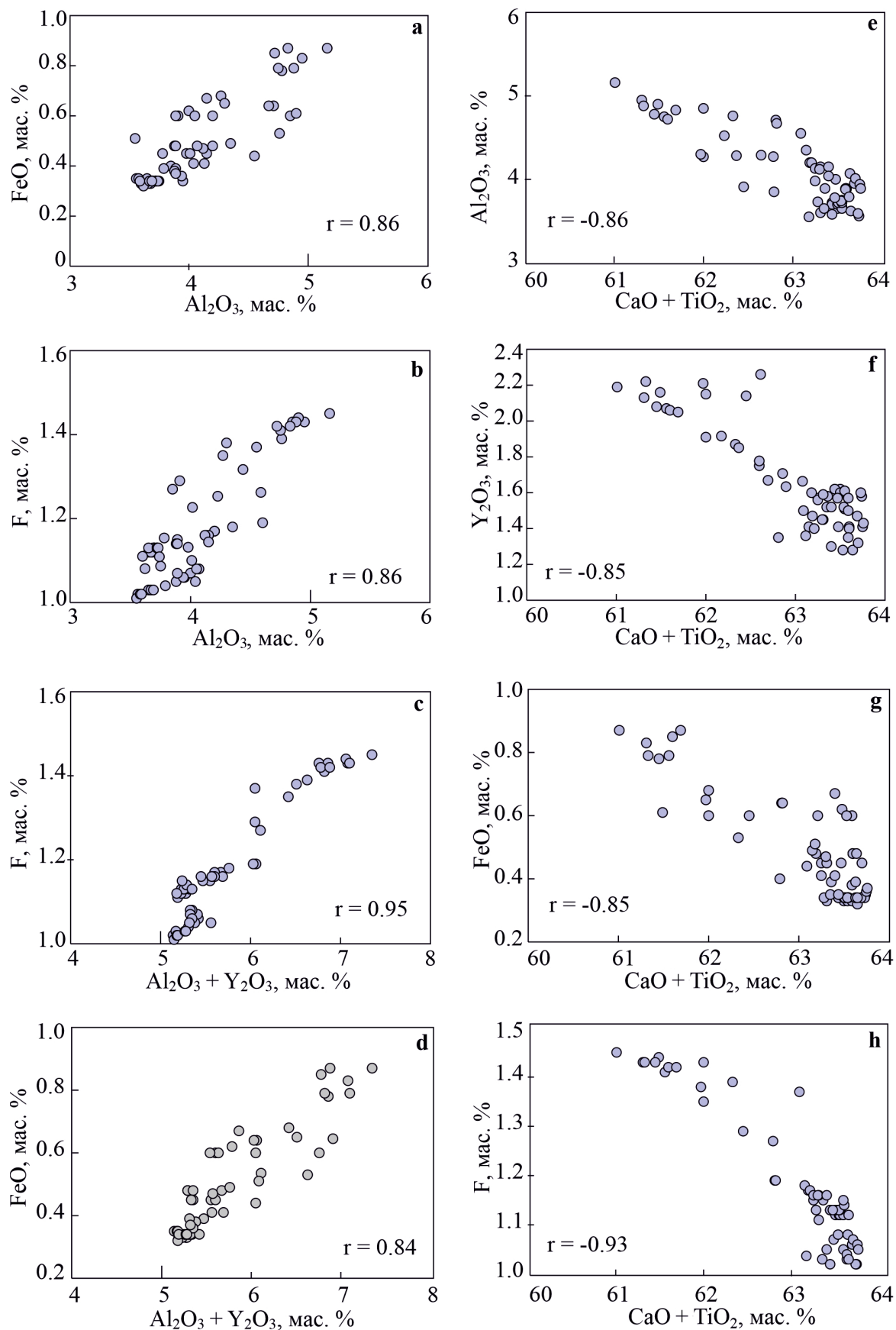


Рис. 4. Зависимость между суммарными содержаниями Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и CaO + TiO<sub>2</sub> в гротите

Fig. 4. The relationship between total contents of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CaO + TiO<sub>2</sub> in grothite



**Рис. 5.** Корреляционные зависимости между содержаниями:

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — FeO (a), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — F (b), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — F (c), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — FeO (d), CaO + TiO<sub>2</sub> — Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (e), CaO + TiO<sub>2</sub> — Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (f), CaO + TiO<sub>2</sub> — FeO (g) CaO + TiO<sub>2</sub> — F (h) в гротите

**Fig. 5.** Correlation dependencies between contents:

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — FeO (a), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — F (b), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — F (c), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — FeO (d), CaO + TiO<sub>2</sub> — Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (e), CaO + TiO<sub>2</sub> — Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (f), CaO + TiO<sub>2</sub> — FeO (g) CaO + TiO<sub>2</sub> — F (h) in grothite

Содержание глинозема в гротите из двуслюдяных сланцев ниже (3.6–5.2 мас. %), чем во включениях гротита (до 8.5 мас. %) в цирконах из гранитоидов кристаллического фундамента Южного Ямала (Ерохин и др., 2019), высокоглиноземистом гротите ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  7.9–12.7 мас. %) из руд Березитового золотополиметаллического месторождения Верхнего Приамурья (Вах и др., 2009), в гранат-слюдистых сланцах шихтинской свиты Срединнокамчатского массива и в высокоглиноземистых титанитах ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  до 14 мас. %) из эклогитов, доломитов и мраморов Австрии (Castelli et al., 2002; Franz et al., 1985).

Минеральный состав сланцев и низкие содержания глинозема в гротите могут указывать на возможность его кристаллизации в породах зеленосланцевой фации.

## Выводы

В результате проведенных исследований в сланцах Иртышской зоны смятия (Восточный Казахстан) установлено наличие гротита — фтор-глиноземистой разновидности титанита с иттрием. Общая формула гротита имеет следующий вид:  $(\text{Ca}_{0.94-1.02}\text{Y}_{0.02-0.04}\text{Fe}_{0.01-0.02})\Sigma_{0.99-1.04}(\text{Ti}_{0.83-0.89}\text{Al}_{0.11-0.16})\Sigma_{0.94-1.02}(\text{Si}_{0.95-0.99}\text{Al}_{0.01-0.05})\Sigma_{1.00}\text{O}_4(\text{O}_{0.86-0.91}\text{F}_{0.09-0.14})\Sigma_{1.00}$

Максимальные содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и F характерны для центральных частей крупных зерен гротита из мусковит-биотитовых сланцев, а минимальные — для мелких зерен гротита из биотитовых сланцев, что, по всей видимости, отражает более низкие параметры давления при образовании последних.

Установленный парагенезис биотитовых сланцев: биотит — кварц — альбит — хлорит — и мусковит-биотитовых сланцев: биотит — кварц — альбит — хлорит — серицит (мусковит) — и относительно невысокие содержания глинозема в гротите позволяют предположить его формирование в условиях зеленосланцевой фации метаморфизма.

Авторы выражают благодарность к. г.-м. н. Ю. В. Ерохину за консультацию в вопросах минералогии гротита и рецензентам за замечания, способствовавшие лучшему изложению результатов.

## Литература / References

- Балтыбаев Ш. К., Саватенков В. М., Петракова М. Е. Т-Т-эволюция раннепротерозойских пород Северного Приладожья по данным изучения U-Pb-, Rb-Sr- и Sm-Nd-систем в минералах // Геодинамика и тектонофизика. 2024. Т. 15. № 3. С. 759. DOI: 10.5800/GT-2024-15-3-0759
- Balalybaev Sh. K., Savatenkov V. M., Petrakova M. E. T-T evolution of early Proterozoic rocks of the Northern Priladozhye region based on the study of U-Pb, Rb-Sr and Sm-Nd systems in minerals. Geodinamika i tektonofizika, 2024, V. 15, No. 3, p. 759. (in Russian)
- Беспяев Х. А., Полянский Н. В., Ганженко Г. Д., Дьячков Б. А., Евтушенко О. П., Ли Тянь Дэ. Геология и металлогения Юго-Западного Алтая (в пределах территории Казахстана и Китая). Алматы: Гылым, 1997. 288 с.
- Bespaev Kh. A., Polyanskii N. V., Ganzhenko G. D., D'yachkov B. A., Evtushenko O. P., Li Tyan' De. Geology and metallogeny of the Southwestern Altai (within the

territory of Kazakhstan and China. Gylym, 1997, 288 p. (in Russian)

Вах А. С., Авченко О. В., Карабцов А. А., Степанов В. А. Первая находка гротита в золоторудных месторождениях // Доклады Академии наук. 2009. Т. 428. № 3. С. 353–357.

Vakh A. S., Avchenko O. V., Karabtsov A. A., Stepanov V. A. First discovery of grothite in gold deposits. Doklady Earth Sciences, 2009, No. 428(3), pp. 353–357. (in Russian)

Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Издание второе. Серия Горно-Алтайская. Лист М-44-III (Новоогорьевское). Объяснительная записка. М.: Московский филиал ФГБУ ВСЕГЕИ, 2019. 180 с.

State Geological Map of the Russian Federation on a scale of 1 : 200 000. The second edition. Gorno-Altayskaya series. Sheet M-44-III (Novoogoryevskoye). Explanatory note. Moscow: VSEGEI Moscow branch, 2019, 180 p. (in Russian)

Ермолов П. В., Мусина Е. В., Портнов В. С. Геологическая позиция и возраст регионально метаморфизованных пород Иртышской зоны смятия // Труды университета. 2018. № 4(73). С. 53–57.

Ermolov P. V., Musina E. V., Portnov B. C. Geological position and age of regionally metamorphosed rocks of the Irtysh Shear Zone. Univ. Proc., 2018, No. 4(73), pp. 53–57. (in Russian)

Ермолов П. В. Актуальные проблемы изотопной геологии и металлогении Казахстана. Караганда: Издательско-полиграфический центр Казахстанско-Российского университета, 2013. 203 с.

Ermolov P. V. Current issues of isotope geology and metallogeny of Kazakhstan. Karaganda: Kazakhstan-Russia University, 2013, 203 p. (in Russian)

Ерохин Ю. В., Иванов К. С., Хиллер В. В. Включения гротита в цирконе из гранитоидов кристаллического фундамента Южного Ямала // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2019. Т. 22. № 1. С. 5–11. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-1-5-11

Erokhin Yu. V., Ivanov K. S., Khiller V. V. Inclusions of grothite in zircon from granitoids of the crystalline basement of the Southern Yamal. Vestnik MSTU, 2019, V. 22, No. 1, pp. 5–11. (in Russian)

Кориш Е. Х., Савко К. А., Базиков Н. С., Ларионов А. Н. Возраст сиенитов палеопротерозойского дубравинского супрасубдукционного щелочно-карбонатитового комплекса Курского блока Сарматии // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2024. № 1. С. 4–13. DOI: 10.17308/geology/1609-0691/2023/4/4-13

Korish E. H., Savko K. A., Bazikov N. S., Larionov A. N. Age of syenites of the Paleoproterozoic Dubravinsky suprasubduction alkaline-carbonatite complex of the Kursk block of Sarmatia. Vestnik of Voronezh State University. Series: Geology, 2024, No. 1, pp. 4–13. (in Russian)

Навозов О. В., Соляник В. П., Клепиков Н. А., Караваева Г. С. Нерешенные вопросы пространственной и генетической связи некоторых видов полезных ископаемых с интрузиями Калба-Нарымской и Западно-Калбинской зон Большого Алтая // Геология и охрана недр. 2011. № 4. С. 66–72.

Navozov O. V., Solyanik V. P., Klepikov N. A., Karavaeva G. S. Unresolved issues of spatial and genetic connec-



- tion of some types of minerals with intrusions of the Kalba-Narym and West Kalba zones of the Greater Altai. *Geology and protection of the subsoil*, 2011, No. 4, pp. 66–72. (in Russian)
- Скублов С. Г., Мамыкина М. Е., Ризванова Н. Г. U-Pb-возраст и редкоэлементный состав титанита из гранитов Белокурихинского массива, Горный Алтай // *Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета*. 2021. Т. 24. № 2. С. 168–177. DOI: 10.21443/1560-9278-2021-24-2-168-177
- Skublov S. G., Mamykina M. E., Rizvanov, N. G. U-Pb age and rare element composition of titanite from granites of the Belokurikha massif, Altai Mountains. *Vestnik MSTU*. 2021, V. 24, No. 2, pp. 168–177. (in Russian)
- Тарарин И. А., Бадреддинов З. Г., Чубаров В. М., Шарова О. И. Гротит гранат-слюдистых кристаллических сланцев шихтинской свиты Срединнокамчатского массива // *Доклады Академии наук*. 2011. Т. 438. № 6. С. 809–812.
- Tararin I. A., Badredinov Z. G., Chubarov V. M., Sharov, O. I. Grothite of garnet-micaceous crystalline schists of the Shikhtinskaya suite of the Sredinnokamchatka massif. *Doklady Earth Sciences*, 2011, V. 438, No. 6, pp. 809–812. (in Russian)
- Хромых С. В., Цыганков А. А., Котлер П. Д., Навозов О. В., Крук Н. Н., Владимиров А. Г., Травин А. В., Юдин Д. С., Бурмакина Г. Н., Хубанов В. Б., Буянтыев М. Д., Анциферова Т. Н., Караваяева Г. С. Позднепалеозойский гранитоидный магматизм Восточного Казахстана и Западного Забайкалья: тестирование плюмовой модели // *Геология и геофизика*. 2016. № 5. С. 983–1004. DOI 10.15372/GiG20160510
- Khromykh S. V., Tsygankov A. A., Kotler P. D., Navozov O. V., Kruk N. N., Vladimirov A. G., Travin A. V., Yudin D. S., Burmakina G. N., Khubanov V. B., Buyantuev M. D., Antsiferova T. N., Karavaeva G. S. Late Paleozoic granitoid magmatism of East Kazakhstan and Western Transbaikalia: testing the plume model. *Geology and geophysics*, 2016, No. 5, pp. 983–1004. DOI 10.15372/GiG20160510. (in Russian)
- Castelli D., Rubatto D. Stability of Al- and F-rich titanite in metacarbonate: petrologic and isotopic constraints from a polymetamorphic eclogitic marble of the internal Sesia Zone (Western Alps) // *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002. Vol. 142. № 6. P. 627–639. DOI: 10.1007/s00410-001-0317-6
- Franz G., Spear F. Aluminous titanite (sphene) from the Eclogite Zone, south-central Tauern Window, Austria // *Chemical Geology*, 1985. Vol. 50. № 1/3. P. 33–46.
- Frost B. R., Chamberlain K. R., Schumacher J. C. Sphene (titanite): phase relations and role as a geochronometer // *Chemical Geology*, 2001. Vol. 172. No. 1–2. P. 131–148.
- Hayden L. A., Watson E. B., Wark D. A. A thermobarometer for sphene (titanite) // *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2008. Vol. 155. Iss. 4. P. 529–540. DOI: 10.1007/s00410-007-0256-y
- Markl G., Piazzolo S. Stability of high-Al titanite from low-pressure calcsilicates in light of fluid and host-rock composition // *American Mineralogist*, 1999. Vol. 84. № 1/2. P. 37–47.
- Oberti R., Smith D. C., Rossi G., Caucia F. The crystal chemistry of high-aluminium titanites // *European Journal of Mineralogy*, 1991. Vol. 3. Iss. 5. P. 777–792. DOI: 10.1127/ejm/3/5/0777
- Russel J. K., Groat L. A., Halleran A. A. D. LREE-rich niobian titanite from mount Bisson, British Columbia: chemistry and exchange mechanisms // *Canadian Mineralogist*, 1994. Vol. 32. № 3. P. 575–587.
- Whitney D. L., Evans B. W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // *American Mineralogist*, 2010. Vol. 95. № 1. P. 185–187. DOI:10.2138/am.2010.3371

Поступила в редакцию / Received 16.10.2024