

**FERROHÖGBOMITE-2S2N IN THE DIATEXITES OF WESTERN SANGILEN,  
SOUTH-EASTERN TUVA, RUSSIA**

A.Yu. Selyatitskii

Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

**ABSTRACT.** In the Western Sangilen (Tuva–Mongolia microcontinent, Central Asian Orogenic Belt, Russia) rare mineral ferrohögbomite-2S2N, for the first time, was found in a deep-seated contact aureole of the early Paleozoic Bayan-Kol gabbro-monzodiorite intrusion. The rocks are diatexites of roof pendant, where metamorphic contact gabbro-norite. Diatexites formed as a result of strong melting and desilication of quartz-bearing kyanite-staurolite schists (M1) during progressive thermal metamorphism (M2) near the Bayan-Kol intrusion with peak at 950 °C, 7–8 kbars. Ferrohögbomite-2S2N grains up to 50 µm in size found in ilmenite-corundum-magnetite-hercynite pseudomorphs. The later formed during progressive stage of thermal metamorphism M2 after regional staurolite M1 and are in cordierite-gedrite-plagioclase restite blocks of diatexites. Ferrohögbomite also appeared as thin (1–5 µm) rims around individual grains of hercynite, corundum and magnetite in a rock matrix. According to microtextural features ferrohögbomite grains formed during post-peak metamorphic stage after minerals of pseudomorphs. A univariant mineral reaction of ferrohögbomite-2S2N formation calculated quantitatively in Fe-Al-Ti-Zn-H<sub>2</sub>O system with program Mathematic 9.0 using electron microprobe chemical composition of minerals of pseudomorphs. The reaction is  $0.96\text{Spl} + 0.194\text{Ilm} + 0.116\text{Mag} + 0.036\text{Crn} + 0.163\text{H}_2\text{O} = 0.163\text{Hgb}$ . A local equilibrium value during formation of ferrohögbomite was probably correlated with pseudomorphs size and thus do not transcend 1 mm<sup>3</sup>. Thermobarometry yields metamorphic temperature and pressure of ferrohögbomite formation as T=665 °C, P=5.8 kbar, which correspond to late retrograde stage of thermal metamorphism of diatexites. To present day in Russia, högbomite group mineral was known only on South Urals and Aldan Shield in Eastern Siberia.

**KEYWORDS:** ferrohögbomite-2S2N; corundum; pseudomorphs; diatexite; thermal metamorphism; Western Sangilen; Thermocalc

**FUNDING:** The study was carried out as part of a state assignment of the Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

**RESEARCH ARTICLE**

Received: December 8, 2021

Revised: February 25, 2022

Accepted: March 15, 2022

**Correspondence:** Alexander Yu. Selyatitskii, [selya@igm.nsc.ru](mailto:selya@igm.nsc.ru)

**FOR CITATION:** Selyatitskii A.Yu., 2022. Ferrohögbomite-2S2N in the Diatexites of Western Sangilen, South-Eastern Tuva, Russia. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (3), 0638. doi:10.5800/GT-2022-13-3-0638

## ФЕРРОХЁГБОМИТ-2S2N В ДИАТЕКТИТАХ ЗАПАДНОГО САНГИЛЕНА, ЮГО-ВОСТОЧНАЯ ТУВА, РОССИЯ

А.Ю. Селятицкий

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

**АННОТАЦИЯ.** В глубинном (7–8 кбар) контактовом ореоле Баянкольского габбро-монцодиоритового массива (Западный Сангилен, Алтае-Саянская складчатая область) в метапелитах, подвергшихся высокой степени плавления (диатектитах), обнаружены ильменит-магнетит-корунд-шпинелевые нодулы, содержащие редкий минерал – феррохёгбомит-2S2N. Железоглиноземистые нодулы представляют собой псевдоморфозы, образованные при прогрессивном распаде ставролита в ходе высокоградиентного термального метаморфизма провесов кровли габбро-норитов. Образование феррохёгбоμίта-2S2N происходило за счет позднего изменения минералов псевдоморфоз. Количественно рассчитанная моновариантная реакция образования минерала в системе Fe-Al-Ti-Zn-H<sub>2</sub>O имеет вид:  $0.96\text{Spl} + 0.194\text{Ilm} + 0.116\text{Mgt} + 0.036\text{Crn} + 0.163\text{H}_2\text{O} = 0.163\text{Hgb}$ . Условия образования феррохёгбоμίта-2S2N – T=665 °C, P=5.8 кбар – отражают позднюю стадию регрессивного метаморфизма диатектитов на границе амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фаций, когда стало возможным образование водосодержащих минералов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** феррохёгбомит-2S2N; корунд; псевдоморфозы; диатектиты; термальный метаморфизм; Западный Сангилен; Thermocalc

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Исследование выполнено в рамках госзадания ИГМ СО РАН.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Феррохёгбомит-2N2S является FeO-содержащим минералом группы хёгбоμίта и образует одноименную подгруппу [Armbuster, 2002] с кристаллохимической формулой  ${}^{\text{IV}}(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Zn}, \text{Al})_6 {}^{\text{VI}}(\text{Al}, \text{Fe}^{3+}, \text{Ti})_{16} \text{O}_{30} (\text{OH})_2$ . Структура минерала состоит из чередующихся шпинелеподобных и ноланитоподобных слоев [Gatehouse, Grey, 1982] и сложена по типу плотнейшей гексагональной упаковки с пространственной группой симметрии  $R\bar{3}m$ . По химическому составу он подобен шпинели-герциниту, но при этом содержит TiO<sub>2</sub> и воду. Поскольку до настоящего времени из подгруппы феррохёгбоμίта в природе известен только один политип, а именно феррохёгбоμίт-2N2S [Schertl et al., 2019], в дальнейшем тексте статьи для описываемого минерала используется сокращенное название «феррохёгбомит».

Первый минерал из группы хёгбоμίта был найден А. Гавелином в 1916 г. при изучении железных руд Швеции. В англоязычной литературе принято считать [Hejny et al., 2002], что первое структурное исследование минералов группы хёгбоμίта выполнено в работе [Gatehouse, Grey, 1982], но еще в 1964 г. Н.В. Беловым дано довольно точное кристаллохимическое описание этого минерала [Belov, 1964]. Долгое время считалось, что он является редкой аксессуарной фазой метаморфических пород, однако в настоящее время за рубежом его довольно часто описывают в месторождениях железных и сульфидных руд и в средне- и высокометаморфизованных высокоглиноземистых метапелитах, недосыщенных кремнеземом (см., например, сводки [Petersen et al., 1989; Armbuster, 2002]). В России находки минералов группы хёгбоμίта по-прежнему редки и описаны на Урале и Алданском щите [Moleva, Myasnikov,

1952; Makagonov, 1998; Bocharnikova et al., 2005; Grew et al., 1989].

На территории Западного Сангилена этот минерал впервые описан автором в работе [Selyatitskii, 2008]. Находка сделана в глубинном контактовом ореоле Баянкольского габбро-монцодиоритового массива, в метапелитах провесов кровли в экзоконтакте габбро-норитов.

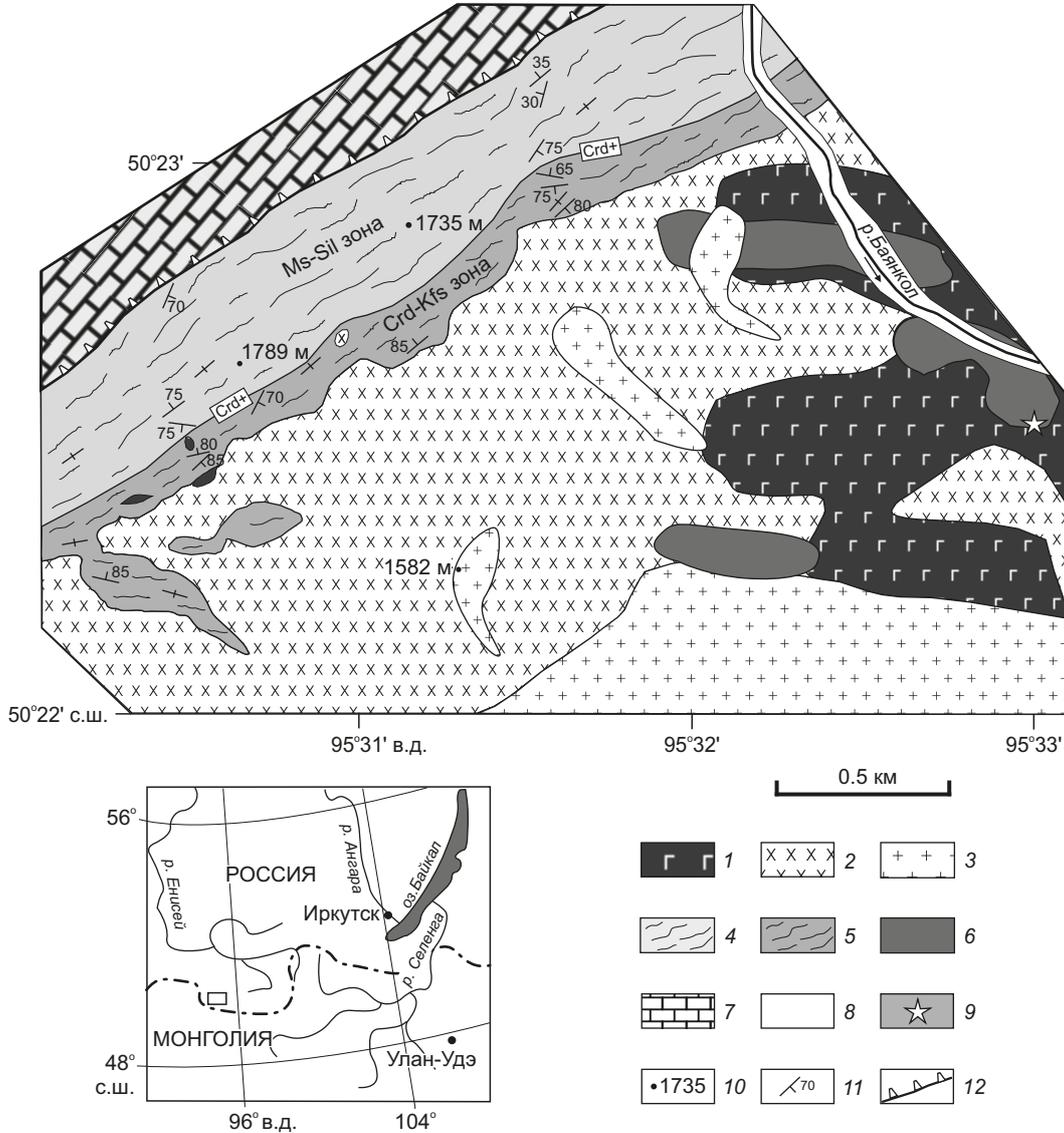
### 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Составы минералов получены на рентгеноспектральном микроанализаторе Jeol JXA-8100 Superprobe в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (аналитик Е.Н. Нигматулина, ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Ускоряющее напряжение составляло 20 кВ, ток поглощенных электронов – 40 нА, диаметр зонда – 2 мкм, время счета 10 с на каждой аналитической линии. Стандартами для анализируемых оксидов служили природные и синтетические минералы. Расчет формульных коэффициентов минералов производился на основе четырех кислородов для шпинели, 31 – для феррохёгбоμίта, 8 – для плагиоклаза, 11 – для биотита, 48 – для ставролита, 3 – для корунда, 18 – для кордиерита, 23 – для жедрита. Количественный расчет моновариантной минеральной реакции образования феррохёгбоμίта выполнялся в программном пакете Mathematica 9.0 по реальным (микронзондовым) составам минералов, пересчитанным на формульные коэффициенты. P-T-условия метаморфизма рассчитывались с помощью программы Thermocalc [Powell et al., 1998] версии tc321 с использованием внутренне согласованной базы термодинамических данных [Holland, Powell, 1998]. Сокращения минералов выполнены по [Whitney, Evans, 2010].

### 3. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ

Синколлизионный Баянкольский габбро-монцодиоритовый массив (рис. 1) ордовикского возраста находится в пределах Эрзинской сдвиговой зоны Западного Сангилен, на юго-западной окраине Тувино-

Монгольского микроконтинента. Подробное геологическое описание со ссылками приводится в работе [Selyatitskii et al., 2021]. Глубина становления массива составляет 26–29 км, т.е. соответствует нижней коре. Вмещающие метapelиты испытали высокоградиентный<sup>1</sup>



**Рис. 1.** Схема метаморфической зональности (M2) в глубинном контактовом ореоле Баянкольского массива, Западный Сангилен (по [Selyatitskii et al., 2021]).

1–2 – породы массива: 1 – габбро-нориты, 2 – монцодиориты и Qtz диориты; 3 – гранитоиды; 4–5 – контактово-метаморфический ореол (волнистые линии – направление сланцеватости): 4 – Ms-Sil зона, 5 – Crd-Kfs зона; 6 – диатектиты провесов кровли; 7 – карбонаты чехла; 8 – аллювиальные отложения; 9 – положение изученного образца с рис. 2; 10 – абсолютные отметки высот; 11 – элементы залегания; 12 – граница тектонического покрова.

**Fig. 1.** Scheme of metamorphic zoning M2 in the deep contact aureole of the Bayan-Kol intrusion, Western Sangilen (after [Selyatitskii et al., 2021]).

1–2 – gabbro-norite (1) and monzodiorite and Qtz diorite (2) of Bayan-Kol intrusion; 3 – granitoids; 4–5 – Ms-Sil (4) and Crd-Kfs (5) zones in contact metamorphic aureole (wave-like symbols show schistosity orientation); 6 – roof pendant diatexites; 7 – carbonate sediments; 8 – alluvium; 9 – sampling sites (Fig. 2); 10 – elevations above sea level (m); 11 – layer dip; 12 – thrust front.

<sup>1</sup> Термин «высокоградиентный» использован в отношении высокотемпературного (высокоградного) метаморфизма с высокими температурными градиентами, превышающими нормальную (по [Kelsey, Hand, 2015]) геотерму континентальной коры. Таким образом, этот термин не привязан к давлению и включает процессы как НТ/ЛР, так и УНТ метаморфизма по [Kelsey, Hand, 2015], а также применим к терминам «контактовый метаморфизм» и «зональный метаморфизм умеренных давлений» в трактовке [Reverdatto et al., 2019].

термальный метаморфизм (M2) при давлении 7–8 кбар, при этом температура на контакте с монцодиоритами достигала 880–910 °С (северная часть массива), в контакте с габбро-норитами – 950 °С (юго-восточная часть массива), что соответствует гранулитовой фации [Selyatitskii et al., 2021]. Термальный метаморфизм в связи с Баянкольским массивом наложен на регионально метаморфизованные гранат-ставролит-кианитовые сланцы этапа M1 с оцененными P-T-параметрами 6–8 кбар, 600–670 °С.

В районе выхода основного тела габброидов в юго-восточной части массива наблюдается субгоризонтальный интрузивный контакт габброидов и метаморфических пород, слагающих кровлю. В контакте с габброидами метапелиты испытали интенсивное плавление и десиликацию с разрушением непрерывной метаморфической слоистости и полосчатости меланосомы и превращены в диатектиты (термин по [Brown, 1973]). Находка феррохёгбоhmита сделана в образце диатектитов из области непосредственного экзоконтакта с габбро-норитами (расстояние до интрузивного контакта 20–30 см).

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Диатектиты неоднородны по текстурно-структурным признакам. Они имеют «мелкоблочный» облик (рис. 2, а) – тугоплавкий глиноземистый остаток представляет собой небольшие, «расташенные» расплавом и разноориентированные фрагменты размером от 2 до 10 см, погруженные в плагиоклаз-кордиеритовый или кордиерит-ждрит-плагиоклазовый матрикс с вкраплениями биотита, зеленой шпинели-герцинита и структурой, напоминающей габбро-офитовую. Можно выделить два вида реститовых фрагментов.

1. Визуально черного цвета, мелкозернистого строения (размер зерен от 5–20 до 100 мкм), вытянутой, змеевидной или округлой формы; состоят из зерен ильменита, корунда, шпинели, магнетита и биотита, «плавающих» среди зерен плагиоклаза и, реже, кордиерита. В рудных скоплениях округлой формы встречаются реликтовые зерна граната. В реститах этого типа встречены полиминеральные глиноземистые обособления овальной формы (нодулы) размером до 500×700 мкм, состоящие из зерен ильменита, корунда, магнетита, герцинита и феррохёгбоhmита (размер зерен до 50 мкм), окруженные зернистым агрегатом плагиоклаза матрикса (рис. 2, б, в, г). Кроме того, тонкие (1–5 мкм) незамкнутые каемки феррохёгбоhmита нарастают на индивидуальные зерна (30–45 мкм) шпинели, корунда и магнетита, встречающиеся в плагиоклазовом матриксе (рис. 2, д).

2. Светлые, иногда голубоватого цвета, фрагменты таблитчатой формы; состоят преимущественно из сплошных масс неравномерно-зернистого (50–500 мкм) Spl-Bt-Pl-Crd матрикса и порфиробластового кордиерита (до 2–3 мм), содержащего мелкие вкрапления магнетита, шпинели и полурастворившиеся реликты биотита неправильной формы, в котором находятся

гексагональные кристаллы корунда, шпинель, магнетит, ставролит и хёгбоhmит. Ставролит образует призматические кристаллы внутри или по границе с биотитом и каемки вокруг шпинели, магнетита и корунда (рис. 2, е) и, по всей вероятности, является поздним, образовавшимся на регрессивном этапе по минералам пика. Хёгбоhmит образует изометричные зерна в биотите и незамкнутые каймы по зернам шпинели совместно со ставролитом (рис. 2, е). Кроме того, в таких реститовых фрагментах отмечены сохранившиеся порфиробласты граната, содержащие вкрапления шпинели, кордиерит и биотит.

Химический состав феррохёгбоhmита и окружающих его минералов представлен в табл. 1. Шпинель по составу отвечает герциниту с переменным количеством ZnO. Содержание этого компонента в феррохёгбоhmите прямо пропорционально его содержанию в соседних зернах шпинели, с которыми он контактирует или которые окаймляет (рис. 3, а, в). При этом состав шпинели практически постоянный в различных зернах одного нодуля, но в разных нодулях содержание ZnO в шпинели может варьироваться очень сильно (Прил. 1, табл. 1; рис. 3, а). Соответственно изменяется и содержание ZnO в феррохёгбоhmите – от 2.67 до 6.27 мас. %. Минимальное содержание ZnO отмечается в каемках феррохёгбоhmита по отдельным зернам шпинели и магнетита матрикса (ZnO ~1.25 мас. %) из реститов первого типа, а также в зернах феррохёгбоhmита в реликтах биотита (ZnO=0.43–0.50 мас. %) из реститов второго типа. Подобная, но несколько более слабая корреляция отмечается для MnO (рис. 3, б, г). Некоторые зерна корунда имеют голубоватую окраску и содержат FeO до ~0.9 мас. %.

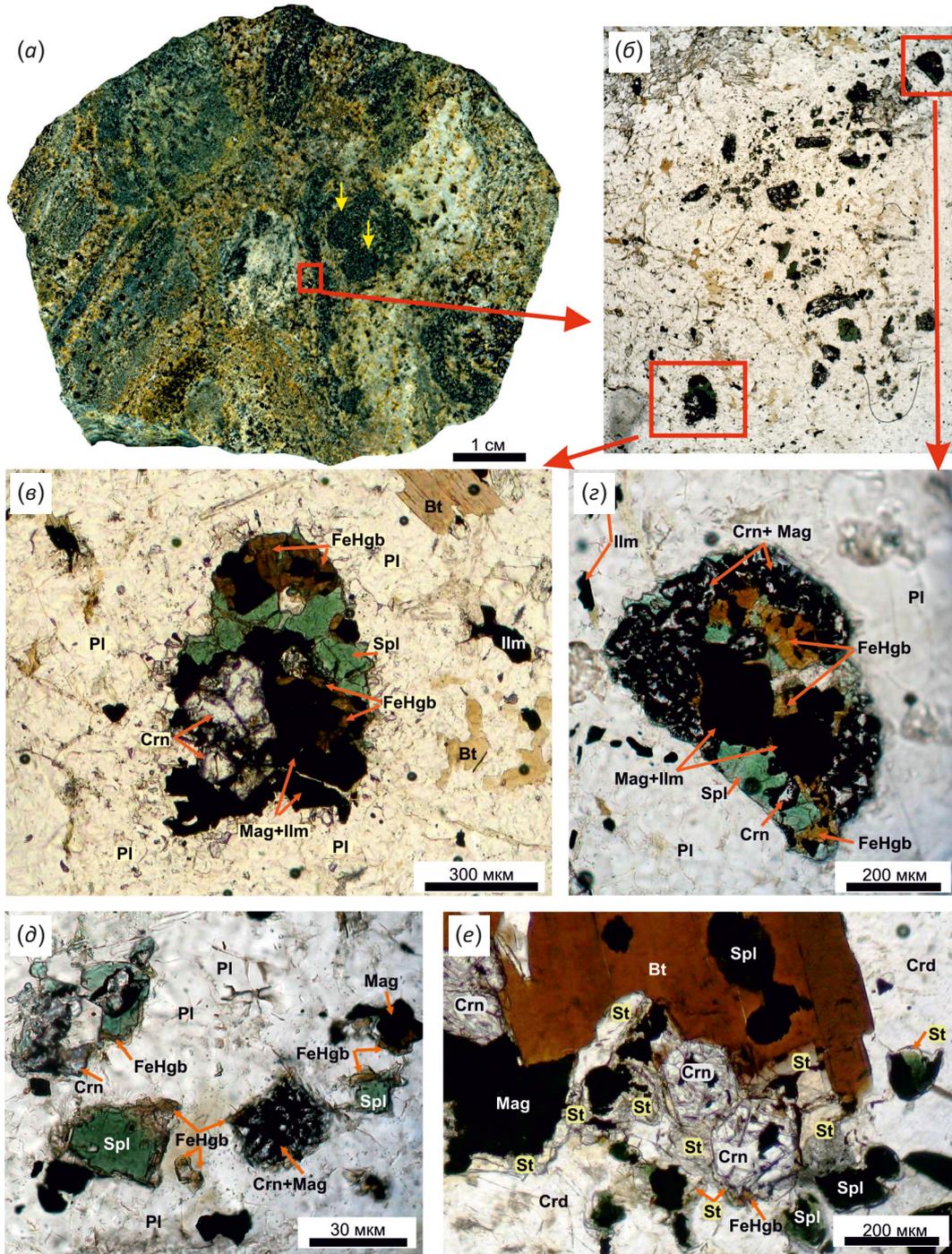
По нашему мнению, феррохёгбоhmитсодержащие нодулы возникли при замещении зерен первичного ставролита этапа M1 ильменитом, шпинелью, магнетитом и корундом на прогрессивной стадии термального метаморфизма M2 и по сути являются глиноземистыми псевдоморфозами.

Факторы, которые позволяют считать описываемые глиноземистые нодулы псевдоморфозами именно по ставролиту, следующие:

– По форме и размеру они соответствуют сохранившимся реликтам ставролита этапа M1, который описан для северо-западной части ореола в контакте с монцодиоритами и содержит ZnO до 2.2 мас. % (рис. 3; табл. s6 в [Selyatitskii et al., 2021]).

– Зерна шпинели в глиноземистых псевдоморфозах имеют высокое содержание ZnO (~4–13 мас. %, Прил. 1, табл. 1), которое указывает на наличие этого элемента в минерале-предшественнике. В северо-западной части ореола шпинель, замещающая ставролит, также характеризуется высоким содержанием ZnO – до 19 мас. % (табл. s7 в [Selyatitskii et al., 2021]).

– Псевдоморфозы по гранату (см. рис. 2, а), которые образуются в некоторых участках диатектитов, имеют строго округлую форму, гораздо больший размер (до 0.5 см) и иную ассоциацию минералов: кордиерит,



**Рис. 2.** Микрофотографии шлифов диатектитов из глубинного контактово-метаморфического (M2) ореола Баянкольского габбро-монцодиоритового массива, Западный Сангилен.

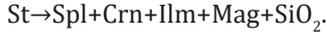
(a) – полированный образец диатектита с тугоплавкими реститовыми фрагментами, погруженными в анатектический расплав; желтые стрелки указывают на псевдоморфозы по гранату; (б, в, г) – феррохөгбоhmитсодержащие ильменит-магнетит-корунд-шпинелевые псевдоморфозы по регионально-метаморфическому ставролиту M1; (д) – мелкие зерна шпинели, голубого корунда и магнетита матрикса с тонкими каемками феррохөгбоhmита; (е) – каймы новообразованного регрессивного ставролита (M2) вокруг шпинели, корунда, магнетита и биотита; в нижней части фотографии – фрагмент каймы феррохөгбоhmита по кристаллу корунда.

**Fig. 2.** Plane photomicrographs of diatexites from deep contact metamorphic aureole (M2) near Bayan-Kol gabbro-monzodiorite intrusion of Western Sangilen.

(a) – polished specimen of diatexites with refractory restite fragments, submerged into anatectic melt; yellow arrows show garnet pseudomorphs; (б, в, г) – ferrohögbohmite-bearing ilmenite-magnetite-corundum-spinel pseudomorphs after regional metamorphic staurolite (M1); (д) – fine grains of matrix spinel, blue corundum and magnetite with thin ferrohögbohmite rims; (е) – rims of retrograde staurolite (after M2) around spinel, corundum, magnetite and biotite and small fragment of ferrohögbohmite rim around corundum in lower part of the photo.

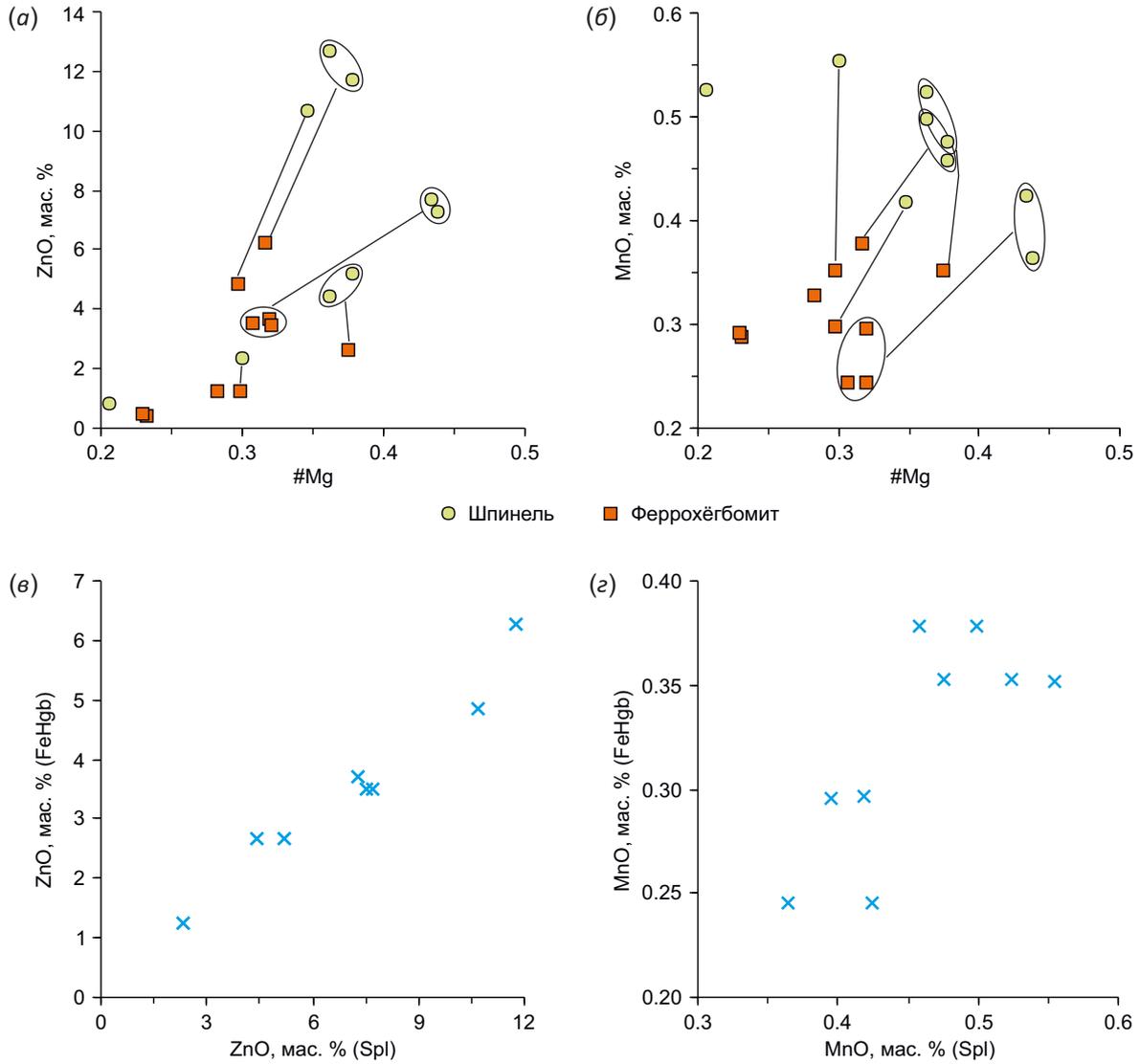
жедрит, биотит, магнетит, шпинель, а также многочисленные небольшие резорбированные фрагменты самого граната. При этом включения шпинели, которые содержатся в незамещенных порфиробластах граната диатектитов, имеют низкое содержание ZnO ( $\approx 0.70$  мас. % табл. s7 в [Selyatitskii et al., 2021]).

Предполагаемая схема минеральной реакции образования глиноземистых псевдоморфоз при разложении ставролита M1 следующая:



В псевдоморфозах отсутствуют Si-содержащие минералы, поэтому логично предположить, что реакция разложения ставролита не изохимична по кремнию и этот компонент мигрирует с фронта реакции в окружающий матрикс, в котором основным Si-содержащим минералом является плагиоклаз-битовнит.

P-T-условия образования диатектитов на пике глущинного контактового метаморфизма соответствуют гранулитовой фации: P=7-8 кбар, T=950 °C [Selyatitskii et al., 2021]. Однако, согласно приведенным выше



**Рис. 3.** Состав феррохөгбоμίта и шпинели из диатектитов глубинного контактово-метаморфического (M2) ореола Байанкольского габбро-монциодоритового массива, Западный Сангилен.

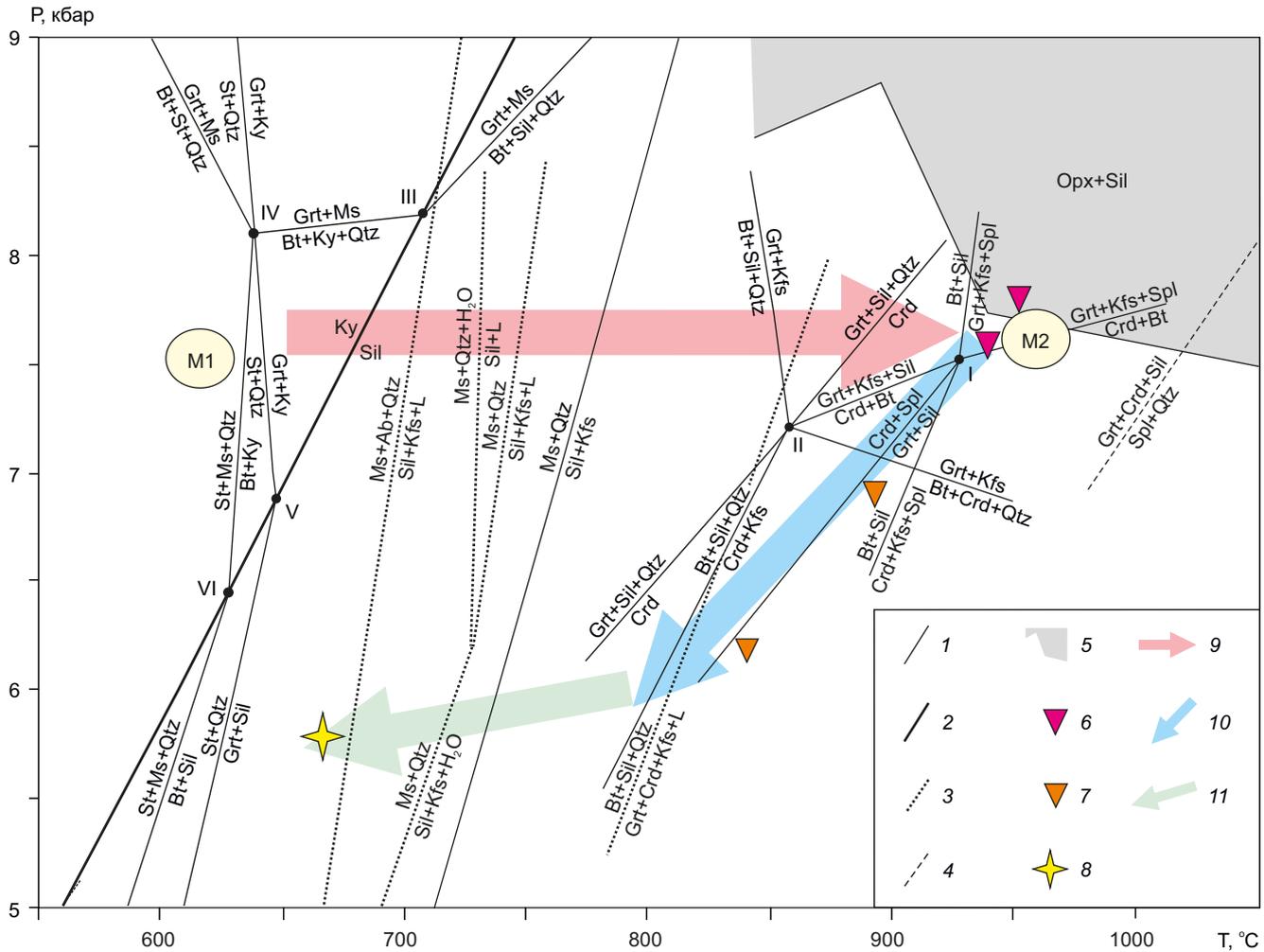
(a), (б) – диаграммы #Mg-ZnO (a) и #Mg-MnO (б) для феррохөгбоμίта и шпинели; #Mg=(Mg+Fe)/Mg; прямыми линиями соединены составы феррохөгбоμίта и шпинели, находящиеся в контакте друг с другом; кружками обведены составы зерен из одной псевдоморфозы; (e), (z) – корреляция состава контактирующих зерен феррохөгбоμίта и шпинели по ZnO (e) и MnO (z). Составы минералов из приведенной Прил. 1, табл. 1.

**Fig. 3.** Electron microprobe composition of ferrohögboomite-2N2S and spinel from diatexites in the deep-seated contact metamorphic aureole of the Bayan-Kol intrusion, Western Sangilen.

(a), (б) – #Mg-ZnO (a) and #Mg-MnO (б) diagrams for ferrohögboomite-2N2S and spinel; #Mg=(Mg+Fe)/Mg; straight lines connect compositions of ferrohögboomite-2N2S and spinel in a contact to each other; circles outline compositions of grains from the same pseudomorphs; (e), (z) – correlation of ZnO (e) and MnO (z) for contacting grains of the ferrohögboomite-2N2S and spinel. Mineral compositions are from App. 1, Table 1.

микроструктурным признакам (каймы минерала по отдельным зернам глиноземистых и рудных минералов в матриксе (см. рис. 2, д, е)), собственно феррохёгбомит образовался не на пике, а на регрессивной стадии при замещении шпинели, корунда, магнетита и ильменита.

Рассчитанное количественно уравнение моновариантной минеральной реакции образования феррохёгбоMITа в глиноземистых псевдоморфозах в системе Fe-Al-Ti-Zn-H<sub>2</sub>O имеет следующий вид:



**Рис. 4.** Условия образования феррохёгбоMITа в диатектитах глубинного контактово-метаморфического ореола Байанкольского габбро-монцодиоритового массива.

1 – линии моновариантных равновесий метapelитов в системе KMAsh, рассчитанные в Thermocalc версии 3.21 (подробности в [Selyatitskii et al., 2021]); 2 – граница фазового перехода Ky-Sil по данным Thermocalc-3.21; 3 – линии реакций в системе KFMASH [Spear et al., 1999]; 4 – граница устойчивости парагенезиса Spl+Qtz [Harley, 1998]; 5 – поле стабильности парагенезиса Opx+Sil в системе KFMASH [Carrington, Harley, 1995]; 6–7 – P-T-условия образования диатектитов в провесах кровли на контакте с габброидами (по данным [Selyatitskii et al., 2021]); 6 – пик, 7 – раннерегрессивная стадия; 8 – P-T-условия образования феррохёгбоMITа-2S2N; 9–10 – P-T-тренды метаморфической эволюции метapelитов в термальном ореоле, по данным [Selyatitskii et al., 2021]; 9 – прогрессивный от регионально-метаморфического этапа M1 до пика M2, 10 – регрессивная P-T эволюция M2; 11 – позднегегрессивный этап M2, установленный в данной работе.

**Fig. 4.** P-T conditions of ferrohögboomite-2S2N formation in the diatexite in the deep contact metamorphic aureole of the Bayan-Kol gabbro-monzodiorite intrusion.

1 – univariant equilibrium line in KMAsh system calculated in Thermocalc 3.21 (more details in [Selyatitskii et al., 2021]); 2 – Ky-Sil phase transition boundary, according to Thermocalc 3.21; 3 – reaction lines in the KFMASH system [Spear et al., 1999]; 4 – stability limits of Spl+Qtz assemblage [Harley, 1998]; 5 – stability field of Opx+Sil assemblage in the KFMASH system [Carrington, Harley, 1995]; 6–7 – P-T parameters of diatexite formation in the roof pendant in the contact with gabbro-norite (after [Selyatitskii et al., 2021]); 6 – the peak of contact metamorphism M2, 7 – early retrograde stage; 8 – P-T conditions for ferrohögboomite-2S2N formation; 9–10 – metamorphic P-T trends of metapelite in the thermal aureole (after [Selyatitskii et al., 2021]); 9 – progressive one from regional metamorphism M1 to peak stage of contact metamorphism M2, 10 – early retrograde P-T evolution of M2; 11 – late retrograde P-T evolution of M2, from this study.

Термодинамические условия образования хёгбомита изучены слабо. P-T-условия регрессивного метаморфизма и вероятного образования феррохёгбомита были рассчитаны с помощью программы Thermocalc по минеральной ассоциации Bt-Spl-Crn-Crd-St-Mag (см. рис. 2, е; Прил. 1, табл. 1) из реститового фрагмента второго типа и составляют: T=665 °C, P=5.8 кбар. Оцененные ранее P-T-параметры регрессивного метаморфизма диатектитов в 850 °C, 6.4 кбар [Selyatitskii et al., 2021] представляют собой раннюю регрессивную стадию, в то время как полученные в настоящей работе P-T-условия отражают более позднюю стадию регрессивного метаморфизма (рис. 4), когда стало возможным образование водосодержащих минералов (ставролита и феррохёгбомита).

### 5. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Изолированность FeHgb-содержащих глиноземистых псевдоморфоз агрегатом зерен плагиоклаза предполагает, что локально-равновесный объем при образовании феррохёгбомита сопоставим с размерами отдельных нодулей и, таким образом, не превышает 1 мм<sup>3</sup>. Широкое развитие корунда и, особенно, шпинели, отсутствие Si-содержащих фаз в псевдоморфозах и кварца в матриксе предполагают десиликацию контактовых метapelитов в ходе плавления и порционно-го удаления ранних анатектических выплавов, обогащенных кремнекислотой и щелочами. На это же может указывать и основной состав плагиоклаза в матриксе, соответствующий битовниту, а также появление в диатектитах жедрита.

Обнаружение феррохёгбомита в этой ассоциации представляет собой редкую минералогическую находку, характерную для малокремнистых метapelитовых пород гранулитовой и амфиболитовой фаций.

Полученные P-T-данные близки предполагаемым условиям образования хёгбомита из сапфиринсодержащих гранулитов Южной Норвегии: 550–620 °C, 6–7 кбар, в которых он также образовался на стадии регрессивного метаморфизма при замещении шпинели и рутила/ильменита [Visser et al., 1992].

Таким образом, феррохёгбомит в диатектитах термального ореола Баянкольского массива представляет собой продукт позднего регрессивного метаморфизма на границе амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фаций и образовался по ранним железоглиноземистым минералам контактово-метаморфического этапа M2: шпинели, корунду, магнетиту и ильмениту, заместившим ставролит предыдущего этапа метаморфизма (M1).

### 6. БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит сотрудников ИГМ СО РАН д.г.-м.н. А.Э. Исоха и к.г.-м.н. В.Г. Владимирова за помощь при проведении полевых работ, к.г.-м.н. В.В. Хлестова за консультации по расчету минеральных реакций в программном пакете Математика, а также рецензента к.г.-м.н. Л.З. Резницкого (ИЗК СО РАН) за конструктивные

замечания, позволившие улучшить первоначальный вариант статьи.

### 7. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Автор заявляет об отсутствии у него конфликта интересов. Автор прочитал и согласен с опубликованной версией рукописи.

The author has no conflicts of interest to declare. The author has read and agreed to the published version of the manuscript.

### 8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Armbruster T., 2002. Revised Nomenclature of Högbohmite, Nigerite, and Taaffeite Minerals. *European Journal of Mineralogy* 14 (2), 389–395. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2002/0014-0389>.

Belov N.V., 1964. Sketches in Structural Mineralogy. 103. Högbohmities – Ti-hexagonal Spinels. *Collected Articles on Mineralogy of L'vov University* 18 (4), 371–376 (in Russian) [Белов Н.В. Очерки по структурной минералогии. 103. Хёгбомиты – Ti-гексагональные шпинели // Минералогический сборник Львовского университета. 1964. № 18. Вып. 4. С. 371–376].

Bocharnikova T.D., Pribavkin S.V., Kholodnov V.V., 2005. Högbohmite from Ilmenite-magnetite Ores of Kusinskiy Massive (South Ural). *Proceedings of the Russian Mineralogical Society* 134 (2), 84–89 (in Russian) [Бочарникова Т.Д., Прибавкин С.В., Холоднов В.В., Воронина Л.К. Хёгбомит из ильменит-магнетитовых руд Кусинского массива (Южный Урал). *Записки Российского минералогического общества*. 2005. Т. 134. № 2. С. 84–89].

Brown M., 1973. The Definition of Metatexis, Diatexis and Migmatite. *Proceedings of the Geologists Association* 84 (4), 371–382. [https://doi.org/10.1016/S0016-7878\(73\)80021-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7878(73)80021-5).

Carrington D., Harley S.L., 1995. Partial Melting and Phase Relations in High Grade Metapelites: An Experimental Petrogenetic Grid in the KFMASH System. *Contribution in Mineralogy and Petrology* 120, 270–291. <https://doi.org/10.1007/BF00306508>.

Gatehouse B.M., Grey I.E., 1982. The Crystal Structure of Högbohmite-8H. *American Mineralogy* 67 (3–4), 373–380.

Grew E.S., Drugova G.M., Leskova N.V., 1989. Högbohmite from the Aldan Shield, Eastern Siberia, USSR. *Mineralogical Magazine* 53 (371), 376–379. <https://doi.org/10.1180/minmag.1989.053.371.14>.

Harley S.L., 1998. Ultrahigh Temperature Granulite Metamorphism (1050 °C, 12 kbar) and Decompression in Garnet (Mg70)-Orthopyroxene-Sillimanite Gneisses from the Rauer Group, East Antarctica. *Journal of Metamorphic Geology* 16 (4), 541–562. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1998.00155.x>.

Hejny C., Gnos E., Grobety B., Armbruster T., 2002. Crystal Chemistry of the Polysome Ferrohögbohmite-2N2S, a Long-Known but Newly Defined Mineral Species. *European Journal of Mineralogy* 14 (5), 957–967. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2002/0014-0957>.

- Holland T.J.B., Powell R., 1998. An Internally Consistent Thermodynamic Data Set for Phases of Petrological Interest. *Journal of Metamorphic Geology* 16 (3), 309–343. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1998.00140.x>.
- Kelsey D.E., Hand M., 2015. On Ultrahigh Temperature Crustal Metamorphism: Phase Equilibria, Trace Element Thermometry, Bulk Composition, Heat Sources, Timescales and Tectonic Settings. *Geoscience Frontiers* 6 (3), 311–356. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2014.09.006>.
- Makagonov E.P., 1998. The Trilling of Perovskite Twins and the Fourlings of Hogbomite from Pits of Shishimsko-Nazyamskie Mountains of the South Urals. Vol. 8. Publishing House of the Institute of Mineralogy UB RAS, Miass, p. 49–56 (in Russian) [Макагонов Е.П. Тройники двойников перовскита и четверники хёгбомита из копей Шишимско-Назымских гор Южного Урала // Уральский минералогический сборник. Миасс: Изд-во ИМин УрО РАН, 1998. № 8. С. 49–56].
- Moleva V.A., Myasnikov V.S., 1952. About Högbomite and Zincohögbohmite as Its Variety. *Doklady of the USSR Academy of Sciences* 83 (5), 733–736 (in Russian) [Молева В.А., Мясников В.С. О хёгбомите и его разновидности цинкхёгбомите // Доклады АН СССР. 1952. Т. 83. № 5. С. 733–736].
- Petersen E.U., Essene E.J., Peacor D.R., Marcotty L.A., 1989. The Occurrence of Högbomite in High-Grade Metamorphic Rocks. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 101, 350–360. <https://doi.org/10.1007/BF00375319>.
- Powell R., Holland T., Worley B., 1998. Calculating Phase Diagrams Involving Solid Solutions via Nonlinear Equations, with Examples Using THERMOCALC. *Journal of Metamorphic Geology* 16 (4), 577–588. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1998.00157.x>.
- Reverdatto V.V., Likhanov I.I., Polyansky O.P., Sheplev V.S., Kolobov V.Yu., 2019. The Nature and Models of Metamorphism. Springer, 330 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-03029-2>.
- Schertl H.-P., Mills S.J., Maresch W.V. (Eds), 2019. A Compendium of IMA-Approved Mineral Nomenclature. Proceedings of the XXII General Meeting of the International Mineralogical Association (August 13–17, 2018, Melbourne, Australia). IMA, 353 p.
- Selyatitskii A.Y., 2008. Rare Mineral Högbomite as Accessory Phase in Diatexites of Western Sangilen. In: Proceedings of the Fourth Youth Siberian International Conference on Earth's Science (December 1–3, 2008). Novosibirsk, p. 241–242 (in Russian) [Селятицкий А.Ю. Редкий минерал феррохёгбомит, как акцессорная фаза в диатектитах Западного Сангилен (Ю.-В. Тыва) // Тезисы докладов Четвертой Сибирской международной конференции молодых ученых по наукам о Земле (1–3 декабря 2008 г.). Новосибирск, 2008. С. 241–242].
- Selyatitskii A.Y., Polyansky O.P., Shelepaev R.A., 2021. A High-Pressure Thermal Aureole of the Bayan-Kol Gabbro-Monzodiorite Intrusion (Western Sangilen, Southeastern Tuva): Evidence for Lower-Crust Mafic Magma Chambers. *Russian Geology and Geophysics*, 62 (9), 987–1005. <https://doi.org/10.2113/RGG20194157>.
- Spear F.S., Kohn M.J., Cheney J.T., 1999. P-T Paths from Anatectic Pelites. *Contribution Mineralogy and Petrology* 134, 17–32. <https://doi.org/10.1007/s004100050466>.
- Visser D., Thijssen P.H.M., Schumacher J.C., 1992. Högbomite in Sapphirine-Bearing Rocks from the Bamble Sector, South Norway. *Mineralogical Magazine* 56 (384), 343–351. <https://doi.org/10.1180/minmag.1992.056.384.06>.
- Whitney D.L., Evans B.W., 2010. Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. *American Mineralogy* 95 (1), 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>.

**Таблица 1.** Микронзондовые составы минералов из диатектитов термального ореола Баянкольского массива, Западный Сангилен  
**Table 1.** Electron microprobe composition of alumina minerals from diatexites of the thermal aureole near Bayan-Kol intrusion, Western Sangilen

Компонент	Псевдоморфоза 1							Псевдоморфоза 2			Псевдоморфоза 3				
	Crn	Spl	Spl	FeHgb	FeHgb	FeHgb	Pl*	Spl	Spl	FeHgb	Crn	Spl	Spl	FeHgb	Pl*
SiO <sub>2</sub>	0.03	0.02	0.03	0.04	0.00	0.00	44.76	0.06	0.02	0.04	0.04	0.00	0.05	0.03	46.47
TiO <sub>2</sub>	0.01	0.00	0.03	5.39	4.58	3.89	0.00	0.02	0.02	5.02	0.04	0.03	0.00	4.93	0.03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99.68	58.33	58.67	59.44	58.61	59.41	35.09	61.62	61.90	61.68	99.40	57.78	59.88	59.25	34.31
FeO	0.57	24.50	24.43	22.95	23.03	22.92	0.46	23.16	23.54	21.17	0.87	22.07	20.87	21.48	0.19
MnO	0.01	0.43	0.36	0.25	0.25	0.30	0.01	0.48	0.52	0.35	0.02	0.46	0.50	0.38	0.01
MgO	0.01	7.89	8.15	5.70	6.06	6.05	0.01	9.94	10.29	7.11	0.01	7.52	6.65	5.57	0.03
CaO	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	18.45	0.02	0.02	0.02	0.01	0.05	0.01	0.02	17.79
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.38	0.36	0.21	0.21	0.17	0.75	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	1.11
K <sub>2</sub> O	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02
ZnO	0.00	7.71	7.30	3.51	3.70	3.50	0.08	5.22	4.41	2.67	0.04	11.75	12.65	6.27	0.02
Сумма	100.34	99.25	99.32	97.48	96.44	96.24	99.64	100.52	100.72	98.06	100.47	99.65	100.62	97.93	99.97
Si	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	2.08	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	2.14
Ti	0.00	0.00	0.00	0.87	0.75	0.64	0.00	0.00	0.00	0.79	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00
Al	1.99	1.94	1.94	15.08	15.09	15.28	1.92	1.97	1.97	15.30	1.99	1.93	1.97	15.09	1.87
Fe	0.01	0.58	0.57	4.13	4.21	4.18	0.02	0.53	0.53	3.73	0.01	0.52	0.49	3.88	0.01
Mn	0.00	0.01	0.01	0.04	0.04	0.05	0.00	0.01	0.01	0.06	0.00	0.01	0.01	0.07	0.00
Mg	0.00	0.33	0.34	1.83	1.97	1.97	0.00	0.40	0.41	2.23	0.00	0.32	0.28	1.80	0.00
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.88
Na	0.00	0.02	0.02	0.09	0.09	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Zn	0.00	0.16	0.15	0.56	0.60	0.56	0.00	0.10	0.09	0.41	0.00	0.25	0.26	1.00	0.00
#Mg	-	0.36	0.38	0.31	0.32	0.32	-	0.43	0.44	0.37	-	0.38	0.36	0.32	-

Таблица 1. (продолжение)

Table 1. (continued)

Компонент	а		б		в	г				д		е
	Spl	FeHgb	Spl	FeHgb	FeHgb	St	Spl	Bt	Crd	FeHgb	FeHgb	Ged
SiO <sub>2</sub>	0.00	0.09	0.04	0.05	0.04	27.77	0.03	35.16	48.67	0.06	0.04	52.72
TiO <sub>2</sub>	0.02	4.66	0.01	3.98	5.33	0.48	0.04	2.62	0.00	6.02	5.70	0.15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60.60	60.58	58.88	60.97	59.52	54.08	57.57	19.34	33.23	58.34	58.05	4.75
FeO	29.97	24.72	22.87	21.86	25.31	12.65	36.60	15.00	5.33	28.03	27.78	17.83
MnO	0.56	0.35	0.42	0.30	0.33	0.39	0.53	0.07	0.20	0.29	0.29	0.94
MgO	7.23	5.88	6.85	5.18	5.59	2.22	5.25	13.19	10.23	4.74	4.64	19.59
CaO	0.02	0.01	0.04	0.04	0.08	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.46
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.11	0.03	0.00	0.02	0.42
K <sub>2</sub> O	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	9.35	0.00	0.02	0.02	0.02
ZnO	2.35	1.25	10.67	4.84	1.22	0.11	0.85	0.00	0.01	0.43	0.50	0.00
Сумма	100.75	97.56	99.77	97.22	97.40	97.70	100.91	94.84	97.70	97.94	97.06	96.89
Si	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	8.11	0.00	3.05	4.97	0.01	0.01	7.58
Ti	0.00	0.75	0.00	0.64	0.86	0.10	0.00	0.17	0.00	0.98	0.93	0.02
Al	1.97	15.27	1.96	15.50	15.09	18.61	1.92	1.98	4.00	14.87	14.93	0.81
Fe	0.69	4.42	0.54	3.94	4.55	3.09	0.87	1.09	0.45	5.07	5.07	2.15
Mn	0.01	0.06	0.01	0.05	0.06	0.10	0.01	0.00	0.02	0.05	0.05	0.12
Mg	0.30	1.88	0.29	1.67	1.79	0.96	0.22	1.71	1.56	1.53	1.51	4.20
Ca	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.12
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.03	0.00	0.00	0.00	0.00
Zn	0.05	0.20	0.22	0.77	0.19	0.02	0.02	0.00	0.00	0.07	0.08	0.00
#Mg	0.30	0.30	0.35	0.30	0.28	0.24	0.20	0.61	–	0.23	0.23	0.66

Примечание. \* – плагиоклаз из вмещающего псевдоморфозу матрикса; а, б – индивидуальные зерна шпинели в матриксе с каймами феррохёгбомита; в – кайма феррохёгбомита по магнетиту матрикса; г – минеральная ассоциация для оценки P-T-условий образования феррохёгбомита в Thermocalc (+Crn, Mag); д – зерна феррохёгбомита в биотите (r); е – жедрит матрикса. #Mg=(Mg+Fe)/Mg.

Note. \* – plagioclase contained ferrohögbohmite-2N2S pseudomorphs; а, б – individual grains of matrix spinel with ferrohögbohmite-2N2S rims; в – ferrohögbohmite-2N2S rim around matrix magnetite; г – mineral association for P-T estimates with Thermocalc (+ corundum, magnetite); д – ferrohögbohmite-2N2S grains in Bt from (r); е – matrix gedrites. #Mg=(Mg+Fe)/Mg.