УДК 549.0 (470.55)

# МАГНЕЗИОХЁГБОМИТ (Mg,F $e^{2+}$ ,Zn)<sub>8</sub>(Al,Ti,F $e^{3+}$ )<sub>20</sub>O<sub>38</sub>(OH)<sub>2</sub> ИЗ ИЛЬМЕНО-ВИШНЕВОГОРСКОГО КОМПЛЕКСА

В.Г. Кориневский, В.А. Котляров, Е.В. Кориневский, А.Б. Миронов, М.В. Штенберг Институт минералогии УрО РАН, г. Muacc; vgkor@mineralogy.ru

# MAGNESIOHÖGBOMITE (Mg,Fe<sup>2+</sup>,Zn)<sub>8</sub>(Al,Ti,Fe<sup>3+</sup>)<sub>20</sub>O<sub>38</sub>(OH)<sub>2</sub> FROM ILMENOGORSKY-VISHNEVOGORSKY COMPLEX

V.G. Korinevsky, V.A. Kotlyarov, E.V. Korinevsky, A.B. Mironov, M.V. Shtenberg Institute of Mineralogy UB RAS, Miass; vgkor@mineralogy.ru

Приведены сведения о первых находках редкого минерала – магнезиохёгбомита из магматических пород Ильмено-Вишневогорского комплекса на Южном Урале. Магнезиохёгбомит обнаружен в шпинель-сапфириновых горнблендитах и в титаномагнетитовых клинопироксенитах, которые слагают глыбы-кластолиты в пластинах серпентинитового меланжа среди гнейсов кыштымской толщи. В горнблендитах зёрна магнезиохёгбомита величиной 0.02– 0.6 мм имеют низкую железистость (f = 0.34–0.49), содержат 6–7 мас. % TiO<sub>2</sub> и примесь  $Cr_2O_3$ до 0.25 мас. %. В клинопироксените магнезиохёгбомит слагает чёрные, просвечивающие в краях коричневым цветом пластинчатые зёрна поперечником от 0.3–0.8 мм до 1–7 мм со смоляным блеском, раковистым изломом и содержит заметно меньше TiO<sub>2</sub> и больше MgO, чем таковой в шпинель-сапфириновых горнблендитах. Интенсивные линии на дифрактограмме магнезиохёгбомита (d, Å; *I*): 4.61 (*26*), 3.37 (*26*), 2.867 (*27*), 2.744 (*53*), 2.492 (*62*), 2.433 (*100*), 2.084 (*42*), 1.982 (*40*), 1.573 (*29*), 1.558 (*21*), 1.519 (*25*), 1.443 (*53*), 1.434 (*44*) – отвечают гексагональной сингонии магнезиохёгбомита с параметрами элементарной ячейки *a* 5.715(5) Å, *c* 23.931(2), *V* 677.01(4) Å<sup>3</sup>. На этом основании его можно отнести к политипу 2*N3S*. Впервые для уральских хёгбомитов приведены их мёссбауэровский и инфракрасный спектры.

Илл. 9. Табл. 6. Библ. 15.

*Ключевые слова:* магнезиохёгбомит, горнблендит, клинопироксенит, серпентинитовый меланж, Ильмено-Вишневогорская зона, Южный Урал.

Rare mineral magnesiohögbomite was found in spinel-sapphirine hornblendites and titanomagnetite clinopyroxenites, which compose the large blocks in tectonic sheets of serpentinites among gneisses of the Kyshtym sequence (Ilmenogosrky-Vyshnevogorsky complex, South Urals). In hornblendite, magnesiohögbomite occurs as grains 0.02–0.6 mm in size. It is characterized by the low iron mole fraction (f = 0.34–0.49) and contains 6–7 wt. % TiO<sub>2</sub> and up to 0.25 wt. %  $Cr_2O_3$ . In clinopyroxenite, magnesiohögbomite forms black (brown at the edges) platy grains 0.3–0.8 mm (up to 1–7 mm) across with pitch luster and conchoidal fracture. It contains considerably less TiO<sub>2</sub> and more MgO relative to that from hornblendites. The intensive lines of its XRD pattern are (d, Å; *I*): 4.61 (*26*), 3.37 (*26*), 2.867 (*27*), 2.744 (*53*), 2.492 (*62*), 2.433 (*100*), 2.084 (*42*), 1.982 (*40*), 1.573 (*29*), 1.558 (*21*), 1.519 (*25*), 1.443 (*53*), 1.434 (*44*). These values reflect hexagonal syngony and indicate the following unit cell parameters of the mineral (Å): *a* 5.715(5), *c* 23.931(2), *V* 677.01(4) Å<sup>3</sup>, which can be ascribed to polytype 2*N*3*S*.

Figures 9. Tables 6. References 15.

*Key words:* magnesiohögbomite, hornblendite, clinopyroxenite, serpentinite mélange, Ilmeno-Vishnevogorsky complex, South Urals.

#### Введение

Минералы группы хёгбомита по химическому составу близки шпинели (плеонасту), отличаясь от неё заметным количеством TiO<sub>2</sub> (до 9 мас. %) и структурой. Эти редкие для Урала минералы до сих пор были встречены лишь на его западном склоне. Сведения об этом приведены в работах О.К. Иванова (2000) и С.В. Колисниченко с коллегами (2014). Первой была находка мелких пластинчатых гексагональных кристаллов в амфиболитах Кусинского массива, а крупные кристаллы были обнаружены при просмотре коллекции Минералогического музея АН СССР (Молева, Мясников, 1952). Эти образцы происходили из минеральных копей Назямских гор в Кусинском районе, где хёгбомит слагает друзовые агрегаты с клинохлором, шпинелью и эпидотом. Самые большие скопления мелких зёрен хёгбомита были позже описаны в ритмично-расслоенных роговообманковых габброидах («амфиболитах») и сплошных ильменит-титаномагнетитовых рудах Копанского и Кусинского месторождений (Карпова, 1974; Бочарникова и др., 2005). Особый интерес представляет обнаружение светло-розового гнездообразного скопления мелких кристаллов хёгбомита в серпентинитах Уфалейского комплекса (Левин и др., 1997). По нашему мнению, это мог быть специфичный по составу кластолит в серпентинитовом меланже этого участка.

Как следует из таблицы 1, уральские хёгбомиты представлены преимущественно железистой разновидностью (Fe > Mg). В большинстве случаев они содержат заметные количества Cr<sub>2</sub>O<sub>2</sub> и ZnO, вплоть до появления особого вида – цинкохёгбомита (см. табл. 1, ан. 3). Считается (Молева, Мясников, 1952), что хёгбомит из ильменит-магнетитовых руд и амфиболитов Кусинского месторождения является минералом вторичным, развивающимся по шпинели. Сейчас имеются доказательства (Ферштатер и др., 2001; Бочарникова и др., 2005), что ильменит-магнетитовые руды Кусинского месторождения и переслаивающиеся с ними роговообманковые габбро («амфиболиты»), в которых концентрируется хёгбомит, имеют магматическое происхождение, следовательно, и этот минерал является первичным. Крупным кристаллам хёгбомита из копей Назямских гор обычно приписывают метасоматическое (скарновое) происхождение, но В.А. Попов (2010) обоснованно считает, что все коллекционные образцы минералов из этого района имеют пространственную и генетическую связь с магматическими телами карбонатного состава (карбонатитами).

Во всём мире магнезиальные разновидности хёгбомита являются одними из самых редких (McKie, 1963; Hejny, Armbruster, 2002). Именно такую разновидность этого минерала мы и обнаружили в породах Ильмено-Вишневогорской зоны. Заметим, что в этой структуре находки хёгбомита были неизвестны (Кобяшев и др., 2000).

## Хёгбомитсодержащие породы Ильмено-Вишневогорской зоны

В районе западного побережья оз. Увильды и в меридиональной полосе шириной до 5 км к северу от него в пределах развития гнейсов и кристаллосланцев кыштымской толщи располагаются вытянутые по простиранию вмещающих пород линзовидные полосы серпентинитового меланжа (В. Кориневский, Е. Кориневский, 2014). Их видимая мощность достигает нескольких сотен метров, а протяжённость обычно не превышает 1 км. В их пределах пологие залесённые холмы сложены хризотиловыми серпентинитами. Среди них располагаются хаотически размещённые каменистые выходы до 5-30 м разнообразных мафитов и ультрамафитов. Преобладают обнажения полосчатых мелкозернистых шпинельсодержащих пироксенамфиболовых анортитовых габбро. Реже встречаются однородные анортитовые средне- и крупнозернистые габбро, в которых иногда проявлена порфировидная структура. Полосчатость в выходах габбро, расположенных в нескольких метрах друг от друга, имеет разнонаправленное (крутое западное или восточное) падение. Полосы мезократовых разновидностей габбро местами сменяются меланократовыми, переходящими в горнблендиты. Более редки выходы своеобразных полосчатых крупнозернистых кварц-диопсид-гранатовых анортитовых габбро, гранатовых и безгранатовых клинопироксенитов и энстатититов, оливинсодержащих ортопироксенитов, гарцбургитов, специфичных шпинель-сапфириновых горнблендитов. Для всех этих пород характерными являются кайнотипный облик, слабое проявление вторичных изменений, сохранность первичных магматических структур, наличие резких контактов с прилегающими серпентинитами. Никаких закономерностей в размещении петрографических типов пород в пределах полос меланжа не выявлено. Подобный

#### Таблица 1

## Химический состав хёгбомитов Урала по литературным данным (мас. %)

Table 1

№ ан.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
TiO <sub>2</sub>	5.08	5.20	5.12	5.15	8.89	5.48	7.23	5.56	6.42	6.72	6.81	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	61.46	62.68	56.67	54.60	54.37	59.49	57.38	59.76	60.76	59.64	58.18	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.04	2.35 2.98 2.00 2.90 2.76 1.95										
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.28	8.28 8.32 9.32 14.93										
FeO	10.30	11.65	8.41	8.24	22.28	24.88	24.87	19.11	19.22	18.50	19.50	
MnO	0.06	0.16	0.80	0.49	_	_	_	_	_	_	_	
MgO	13.07	12.16	9.07	7.00	10.37	4.31	5.75	11.01	8.81	9.83	12.63	
ZnO	1.12	_	11.12		0.80	1.70	1.97	1.05	1.25	1.06	0.49	
Сумма	100.41	100.17	100.51	90.41	99.06	98.84	99.20	99.39	99.22	97.70	99.24	
Кристаллохимические формулы (расчёт на 28 катионов)												
$1. \left(Mg_{4.857}Fe^{2+}_{2.148}Fe^{3+}_{0.777}Zn_{0.206}Mn_{0.013}\right)_{8.001}\left(Al_{18.066}Ti_{0.952}Fe^{3+}_{0.777}Cr_{0.205}\right)_{20}O_{38}(OH)_{2}$												
2. $(Mg_{4.528}Fe^{2+}_{2.434}Fe^{3+}_{1.004})_{7.966}(Al_{18.463}Ti_{0.977}Fe^{3+}_{0.56})_{20}O_{38}(OH)_{2}$												
$3. \left( Mg_{3.534} Zn_{2.146} Fe^{2+}_{1.839} Fe^{3+}_{0.419} Mn_{0.177} \right)_{8.115} (Al_{17.465} Fe^{3+}_{1.420} Ti_{1.115})_{20} O_{38} (OH)_{2}$												
4. $(Mg_{3.005}Fe^{3+}_{2.890}Fe^{2+}_{1.985}Mn_{0.119})_{7.999}(Al_{18.539}Ti_{1.115}Fe^{3+}_{0.346})_{20}O_{38}(OH)_{2}$												
5. $(Mg_{4.032}Fe^{2+}_{3.813}Zn_{0.154})_{7.999}(Al_{16.723}Ti_{1.744}Fe^{2+}_{1.048}Cr_{0.485})_{20}O_{38}(OH)_{2}$												
6. $(Fe^{2+}_{15,544}Mg_{1,711}Cr_{0,411}Zn_{0,334})_8(Al_{18,685}Ti_{1.098}Cr_{0,217})_{20}O_{38}(OH)_2$												
$7. (Fe^{2+}_{5380}Mg_{2.75}Zn_{0.386})_{8.05} (Al_{17.055}Ti_{1.493}Cr_{0.470}Fe^{2+}_{0.122})_{20}O_{38}(OH)_{2}$												
8. $(Mg_{4,173}Fe^{2+}_{3,629}Zn_{0,197})_{7,999}(Al_{17,918}Ti_{1,063}Cr_{0,583}Fe^{2+}_{0,436})_{20}O_{38}(OH)_{2}$												
9. $(Fe^{2+}_{A138}Mg_{3380}Cr_{0.245}Zn_{0.238})_{8.001}(Al_{18.440}Ti_{1.243}Cr_{0.317})_{20}O_{38}(OH)_{2}$												
	10. (Fe	$e^{2+}$ $Mg_{3}$	$Zn_{203}$	$(Al_{18})$	761 Ti 1313	$Cr_{0.400}Fe^{2}$	$^{+}_{0,024})_{20}O_{20}O_{20}$	<sub>a</sub> (OH),				
	11. (M	$g_{4,470}Fe^{2+}$	$_{138}$ Zn <sub>0.092</sub> ).	$(Al_{17.38})$	<sub>81</sub> Ti <sub>1.298</sub> Fo	$e^{2+}_{0.995}C_{1}$	$(0.024 20)_{20}O_{3}$	(OH) <sub>2</sub>				

Примечание. 1, 2, 8, 11 – магнезиохёгбомиты; 3 – «цинкохёгбомит»; 4, 5–7, 9, 10 – феррохёгбомиты.

Минералы из: 1 – амфиболита Кусинского месторождения; 2, 3 – друз совместно с клинохлором, Назямские горы, Кусинский район (Молева, Мясников, 1952); 4 – светло-розовый мелкозернистый агрегат из гнездообразного скопления в серпентинитах, в анализе также определены, мас. %: п.п.п. 1.24; SiO, 6.28; CaO 0.43; Na<sub>2</sub>O 0.23; K<sub>2</sub>O 0.21 (2.5 км СЗ пос. Силач, Уфалейский комплекс; Левин и др., 1997); 5-11 – Кусинского массива (Бочарникова и др., 2005): 5-7 – интерстиций в ильменит-магнетитовых агрегатах, 8-11 – сростков со шпинелью. Здесь и далее: прочерк – не обнаружено; пустая клетка – нет данных. Коэффициенты при О и ОН – по стехиометрической формуле.

Note. 1, 2, 8, 11 - magnesiohögbomite; 3 - «zincohögbomite»; 4, 5-7, 9, 10 - ferrohögbomite.

Minerals from: 1 – amphibolite of the Kusa deposit; 2, 3 – druses along with clinochlore, Nazyam Mountains, Kusa region (Moleva, Myasnikov, 1952); 4 - light pink fine-grained aggregate from a pocket in serpentinites, the analysis also contains (wt. %): LOI 1.24, CaO 0.43, Na<sub>2</sub>O 0.23, K<sub>2</sub>O 0.21 (2.5 km northwest of settlement of Silach, Ufaley complex (Levin et al., 1997)); 5-7 - intersticial aggregates in ilmenite-magnetite ore bodies of the Kusa deposit; 8-11 - intergrowths with spinel (Bocharnikova et al., 2005). Dash - not detected; the empty cell - no data.

состав и строение имеют участки серпентинитового меланжа, описанные ранее в Ильменских горах на участках в районе Осинового мыса на оз. Ишкуль, у северного подножья горы Савелькуль.

Хёгбомит был выявлен нами в трёх разновидностях пород, слагающих кластолиты в серпентинитовом меланже. Одна из них – шпинель-сапфириновый горнблендит – располагается в окрестностях пос. Тайгинка, другая - титаномагнетитовый клинопироксенит - на западном побережье оз. Садок. Здесь же хёгбомит обнаружен в одном из выходов шпинель-амфиболового анортитового габбро. Во всех случаях - это полнокристаллические

с магматическими структурами низкокремнезёмистые, высокомагниевые, низкожелезистые, относительно богатые глинозёмом глубинные породы.

### Методы исследования

Исследование пород и минералов выполнено в Институте минералогии УрО РАН. Шлифы и аншлифы изучены В.Г. Кориневским в проходящем и отражённом свете на микроскопе фирмы «Olympus». Химический состав пород определён классическим способом «мокрой химии» по методике 163-Х (аналитики М.Н. Малярёнок, Т.В. Семёнова). Химический состав минералов определён В.А. Котляровым на электронном микроскопе РЭММА-202М с приставкой LZ-5 Link Systems с Si-Li детектором при ускоряющем напряжении 20-30 кВ и диаметре пучка 1-2 мкм. Мессбауэровские спектры (ЯГРС) образцов магнезиохёгбомита и фассаита получены А.Б. Мироновым на спектрометре СМ-2201 с Со<sup>57</sup> в матрице Rh в режиме постоянных ускорений, в геометрии пропускания при комнатной температуре. Эффективная толщина образцов составляла 10 мг/см<sup>2</sup> железа в естественной смеси, что соответствует приближению тонкого поглотителя. Компьютерное разложение ЯГР-спектров проведено с помощью программы Univem-2. ИК-спектр пропускания магнезиохёгбомита в таблетке с КВг снят на ИК Фурье спектрометре Nicolet-6700 Thermo Scientific. Разрешение спектра 4 см<sup>-1</sup>, обработка проведена с помощью программного комплекса OMNIC Thermo Scientific (аналитик М.В. Штенберг). Рентгенограмма магнезиохёгбомита снята на дифрактометре ДРОН-2.0 с графитовым монохроматором с Си-анодом, шаг съёмки 0.02 °/мин., внутренний эталон – кварц (аналитики П.В. Хворов, Е.Д. Зенович).

#### Тайгинский участок

Разрез одного из тел серпентинитового меланжа среди гнейсов кыштымской толщи обнажён в 3 км к юго-западу от пос. Тайгинка Челябинской области северо-восточнее г. Карабаш в пункте с координатами: 55°36′21.6″ с. ш.; 60°27′43.3″ в. д. В северной придорожной выемке высотой около 2 м на протяжении 20 м можно наблюдать выходы меланократовых средне- и крупнозернистых полнокристаллических массивных пород. Основной объём описываемого обнажения слагают средне- и крупнозернистые оливинсодержащие амфиболовые ортопироксениты. Восточнее ортопироксенитов располагается вертикально залегающее тело гигантозернистых энстатититов мощностью 1.2 м, сложенное расщеплёнными кристаллами энстатита светло-бурого цвета. Призматические индивиды энстатита до 10–15 см нередко образуют радиально-лучистые сростки. Резкие прямолинейные контакты рассматриваемых здесь энстатититов с окружающими породами свидетельствуют о жильной природе этих образований.

Наибольший интерес представляют сапфириновые породы этого разреза. Они обнажаются непосредственно восточнее жильного тела гигантозернистых энстатититов на протяжении 3 м. В пределах этого небольшого участка преобладающими тёмно-серые полнокристаллические являются шпинель-сапфирин-роговообманковые массивные горнблендиты неравномернозернистой структуры (табл. 2, ан. 1). Обычно размеры кристаллических индивидов в них не превышают 5 мм. В большинстве случаев заметно преобладает амфибол (до 70 об. %), участками содержания сапфирина достигают 45 %, а шпинели – до 50 %. На акцессорные и второстепенные минералы в сумме приходится 2-4 % объёма породы. Полосчатости и ориентированного расположения зёрен в породе не отмечено. К числу второстепенных минералов относятся ильменит, корунд, рутил, хёгбомит. Оливин и энстатит в породе не обнаружены. В акцессорных количествах и в виде единичных зёрен присутствуют титаномагнетит, магнетит, циркон, фторапатит, анортит, монацит, алланит, ильменорутил, шеелит, уранинит, торит, ксенотим, вольфрамит, шриланкит. Участками в породе развиваются вторичные минералы: клинохлор, кальцит, тальк, маргарит, гематит, мусковит и альбит. Всего в результате микрозондовых исследований в горнблендитах Тайгинского участка установлено присутствие 30 минералов. В ряде образцов сапфиринсодержащих пород отчётливо проявлена грубозернистая пегматоидная структура и пятнистая, миндалевидная текстура. По своему строению и набору минералов они соответствуют гидротермальному заполнению миароловых пустот в пегматитах. В пегматоидных участках кристаллы сапфирина и амфибола достигают 2-3 см в длину. Промежутки между ними заполнены светлым беловато-серым мелкозернистым агрегатом клинохлора, мусковита, маргарита, корунда, альбита, чешуйками талька, пластинками гематита.

### Таблица 2

# Средний химический состав хёгбомитсодержащих пород и их главных породообразующих минералов Ильмено-Вишневогорского комплекса (мас. %)

Table 2

## Average chemical composition of högbomite-bearing rocks of the Ilmeno-Vishnevogorsky complex and main rock-forming minerals (wt. %)

	Spl-S	pr горнб	блендит	(обр. Сі	п—2)	Ті-Мад клинопироксенит (обр. Сд-3-2)									
	1	1 Минералы				6	Минералы								
	Порола	2	3	4	5	Порола	7	8	9	10	11	12	13		
mopora	110po,Au	Prg	Spr	Spl	Hgb	тороди	Срх	Ti–Mag	Hgb	Dol	Ccl	An	Ap		
SiO <sub>2</sub>	22.63	43.94	12.17	_	-	33.35	44.35	_	—	_	28.49	42.80	0.52		
TiO,	0.47	0.85	_	_	6.42	2.07	1.50	11.95	5.61	_	_	-	_		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	44.65	15.73	64.12	66.64	63.62	13.27	10.64	_	62.59	_	22.21	36.28	_		
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	0.03	0.02	0.10	0.10	0.01	_	_	0.12	_	_	-	_		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.89				17.44	6.74	5.19*	74.09	11.62*						
FeO	2.51	6.30	4.87	15.92		1.77	0.78*	12.64	4.21*	0.11	4.88	0.82	0.47		
MnO	0.06	0.02	_	0.04	_	0.16	0.08	_	0.43	_	_	-	_		
MgO	16.25	16.99	18.55	16.80	12.85	15.50	12.68	_	14.95	22.87	31.80	-	_		
CaO	3.58	11.74	_	_	_	17.60	24.63	_	_	29.75	_	19.38	55.35		
Na <sub>2</sub> O	0.78	2.18	_	_	_	< 0.01	0.02	_	_	_	_	0.34	_		
K,O	0.19	0.32	_	_	_	0.02	_	_	_	_	_	0.12	_		
P.O.	0.14	_	_	_	_	0.79	_	_	_	_	_	-	41.33		
n	1	14	19	14	10	1	11	4	11	3	1	1	3		
Сумма	99.58	98.10	99.73	99.50	100.43	99.45	99.35	98.93	100.03	52.73	87.38	99.74	100.37		
f	0.19	0.17	0.13	0.35	0.41	0.22	0.19		0.36	0.003	0.08				
				Крист	галлохи	мические	формул	ы минера	лов						

 $2.\ (Na_{0.46}K_{0.06})_{0.52}(Ca_{1.76}Na_{0.13}Fe^{2+}{}_{0.11})_2(Mg_{3.54}Al_{0.74}Fe^{3+}{}_{0.54}Ti_{0.09}Fe^{2+}{}_{0.09})_5(Si_{6.15}Al_{1.85})_8O_{22}(OH)_2(\textit{Ha~46 sapados});$ 

3.  $(Mg_{326}Fe_{048})_{374}(Al_{902}Si_{144})_{1046}O_{20}$  (*Ha* O = 20);

4.  $(Mg_{0.64}Fe_{0.34}Al_{0.01})_{0.99}Al_2O_4$  (*Ha* O = 4);

5. (Mg<sub>4,78</sub>Fe<sup>3+</sup><sub>3,22</sub>)<sub>8</sub>(Al<sub>18,72</sub>Ti<sub>1,20</sub>Fe<sup>3+</sup><sub>0.06</sub>Cr<sub>0.02</sub>)<sub>20</sub>O<sub>38</sub>(OH)<sub>2</sub> (на 20 катионов);

7.  $(Ca_{0.98}Fe^{2+}_{0.02})_1(Mg_{0.70}Fe^{3+}_{0.15}Al_{0.11}Ti_{0.04})_1(Si_{1.64}Al_{0.36})_2O_6$  (*Ha* O = 6);

8.  $(Fe_{0.50}^{2+}Fe_{0.26}^{3+}Ti_{0.24})Fe_{2.37}^{3+}O_4$  (*Ha* O = 4);

9.  $(Mg_{5.52}Fe^{3+}_{1.48}Fe^{2+}_{0.87}Mn_{0.09})_{7.96}(Al_{18.28}Ti_{1.01}Fe^{3+}_{0.69}Cr_{0.02})_{20}O_{38}(OH)_{2}$  (*Ha 20 катионов*);

10. Са<sub>0.96</sub>Мg<sub>1.03</sub>(СО<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (на 2 катиона);

11.  $(Mg_{4.47}Fe_{0.38}Al_{0.15})_5(Si_{2.68}Al_{1..32})_4O_{10}(OH)_8$  (*Ha O = 10*);

12.  $(Ca_{0.96}Na_{0.03}Fe_{0.01})(Al_{1.97}Fe_{0.03})_2(Si_{1.99}Al_{0.01})O_8$  (*Ha* O = 8);

13.  $Ca_5(P_{2.95}Si_{0.04}As_{0.03}V_{0.03}^{5+}V_{0.01})_{3.07}O_{12}F_{0.5}$ (на 8 катионов)

Примечание. 1, 6 – химический анализ, аналитики М.Н. Малярёнок, Т.В. Семёнова; 2–5, 7–13 – РЭММА–202М, аналитик В.А. Котляров; \*) Fe<sup>2+</sup> и Fe<sup>3+</sup> – по данным ЯГР-спектроскопии, аналитик А.Б. Миронов. Анализ 1 также содержит (мас. %): H<sub>2</sub>O<sup>-</sup> 0.22, H<sub>2</sub>O<sup>+</sup> 3.01, CO<sub>2</sub> 0.15, ZnO 0.01, NiO 0.01; анализ 6: H<sub>2</sub>O<sup>-</sup> 0.44, H<sub>2</sub>O<sup>+</sup> 3.71, CO<sub>2</sub> 4.01, NiO 0.01; анализ8: V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.25; анализ9: ZnO0.03; анализ10: SrO0.04; анализ13: F1.10, SO<sub>3</sub> 0.54, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.18, As<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.88. п–числоанализов. f–железистость (Fe/(Fe+Mg)). Prg – паргасит, Spr – сапфирин, Spl – шпинель, Hgb – магнезиохёгбомит, Cpx – диопсид, Ti-Mag – титаномагнетит, Dol – доломит, Ccl – клинохлор, An – анортит, Ap – апатит.

*Note.* 1, 6–analysts M.N. Malyarenok and T.V. Semenova; 2–5, 7–13–REMMA–202M, analyst V.A. Kotlyarov. \*) $Fe^{2+}$  and  $Fe^{3+}$  – according to Mössbauer spectroscopy, analyst A.B. Mironov. Analyses 1 also contains (wt. %):  $H_2O^- 0.22$ ,  $H_2O^+ - 3.01$ , CO<sub>2</sub> 0.15, ZnO 0.01, NiO 0.01; analysis 6:  $H_2O^- 0.44$ ,  $H_2O^+ 3.71$ , CO<sub>2</sub> 4.01, NiO 0.01; analysis 8:  $V_2O_5 0.25$ ; analysis 9: ZnO 0.03; analysis 10: SrO 0.04; analysis 13: F 1.10, SO<sub>3</sub> 0.54,  $V_2O_5 0.18$ ,  $As_2O_5 0.88$ ; n – number of analyses. f – iron mole fraction (Fe/Fe+Mg). Prg – pargasite, Spr – sapphirine, Spl – spinel, Hgb – magnesiohögbomite, Cpx – diopside, Ti-Mag – titanomagnetite, Dol – dolomite, Ccl – clinochlore, An – anorthite, Ap – apatite.

Макроскопически чёрные призматические кристаллы амфибола слагают основной объём горнблендитов. Их размеры по измерениям в шлифах колеблются от 0.01-0.25 мм до 1-1.2 мм, а в образцах породы встречаются зёрна длиной 10-30 мм. С кристаллами сапфирина и шпинели амфибол контактирует по резким, нередко извилистым, границам без следов реакционных взаимоотношений. Участками кристаллы амфибола содержат включения зёрен шпинели и сапфирина без следов коррозии последних. Иногда встречаются включения очень мелких кристаллов циркона, монацита, рутила, тончайшие пластинчатые вростки торита. Химический состав большинства зёрен амфибола соответствует паргаситу, часть – чермакиту (см. табл. 2, ан. 2).

Тёмные голубовато-серые кристаллы сапфирина величиной 0.25–30 мм распределены в горнблендитах весьма неравномерно: его содержания меняются от 2 до 45 % объёма породы. Включения в кристаллах сапфирина немногочисленны – шпинель, амфибол, хёгбомит, рутил, иногда ильменит. Химический состав сапфирина относительно постоянен (см. табл. 2, ан. 3), в заметных количествах рассеянных элементов не зафиксировано.

Изометричные зёрна травяно-зеленой шпинели (в шлифах) неравномерно размещены в призматически-зернистой массе кристаллов амфибола. Размеры выделений шпинели колеблются в пределах 0.01-3.2 мм, границы их с сапфирином и амфиболом резкие, без следов реакционных взаимоотношений. Лишь в местах соприкосновения с пластинчатым агрегатом клинохлора вдоль периферии зёрен шпинели появляется тёмная тонкозернистая каёмка гематита или последовательно сменяющиеся реакционные каёмки из мелких выделений корунда, маргарита, мусковита, альбита. Посторонних включений в кристаллах шпинели, как правило, не наблюдалось, за исключением редких выделений кальцита и корунда. Химический состав шпинелевых зёрен довольно однороден (см. табл. 2, ан. 4), отвечает составу плеонаста, не содержащего Zn, но повсеместно присутствует небольшое количество Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, иногда отмечается редкая вкрапленность хромшпинели.

Помимо впервые описанного в этой части Урала сапфирина, особый интерес вызывает обнаружение в этой же породе хёгбомита. Из-за очень мелких зёрен (0.02–0.6 мм) вначале его удалось обнаружить лишь под электронным микроскопом РЭММА-202 М,

затем – при просмотре шлифов. Минерал распознаётся по характерной тёмной зеленовато-бурой окраске, анизотропности, одноосности, наличию параллельных трещин спайности. Встречается хёгбомит редко (менее 1 об. % породы), преимущественно в виде пластинчатых, иногда изометричных включений в сапфирине, реже в шпинели или на границе зёрен амфибола (рис. 1, 2). Границы зёрен хёгбомита с окружающими минералами резкие. Диагностика хёгбомита подтверждена данными микрозондового анализа, из которых следует, что здесь наблюдается существенно магниевая его разновидность – магнезиохёгбомит (табл. 3, ан. 1-5, 7-10). Он содержит большие количества ТіО, (6-7 мас. %), незначительные – Cr<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (0–0.25 мас. %), имеет низкую железистость (0.34-0.49). Один из анализов относится к феррохёгбомиту (см. табл. 3, ан. 6).



*Рис. 1.* Форма включений магнезиохёгбомита (Hgb) в кристаллах сапфирина (Spr).

а – образец Сп-2, б – образец Сп-14. BSE-фото.

*Fig. 1.* Morphology of magnesiohögbomite (Hgb) inclusions in sapphirine (Spr) crystals.

a – sample Sp-2, δ – sample Sp-14. BSE-photo.



*Рис.* 2. Компромисные границы выделений магнезиохёгбомита (Hgb) среди кристаллов шпинели (а) и между зёрнами амфибола (б) в шпинель-сапфириновых горнблендитах Тайгинского участка.

Шлифы, без анализатора. Spl – шпинель, Ccl – клинохлор, Mrg – маргарит, Amp – амфибол, Spr – сапфирин. *Fig. 2.* Compromise boundaries of magnesiohögbomite (Hgb) among spinel crystals (a) and amphibole grains (б) in spinel-sapphirine hornblendites of the Tayginka area.

Thin sections, nicols ||. Spl – spinel, Ccl – clinochlore, Mrg – margarite, Amp – amphibole, Spr – sapphirine.

Горнблендиты Тайгинского участка характеризуются совместно образовавшимися паргаситом, сапфирином, магнезиохёгбомитом и плеонастом без признаков реакционных взаимоотношений друг с другом. Неравнозернистая полнокристаллическая структура горнблендитов, их массивная неориентированная текстура, отсутствие «теней» предшествующих минеральных ассоциаций, наличие первичных кристаллических включений разнообразных минералов и незначительное развитие вторичных преобразований породы позволяют признать сапфирин-шпинелевый горнблендит Тайгинского участка породой магматической.

#### Западное побережье озера Садок

Среди кластолитов в серпентинитовом меланже у западного берега оз. Садок изредка встречаются выходы клинопироксенитов. Среди них имеются разновидности с гранатом, эпидотом, шпинелью, клинтонитом, которые обычно наблюдаются в разобщённых обнажениях (Кориневский и др., 2015). Одно из них располагается неподалёку от берега оз. Садок на вершине небольшого холма с координатами: 55°32′47.3″ с. ш.; 60°23′04.6″ в. д.

Невысокая (0.5 м) каменистая гривка меридионального простирания протягивается на 4.5 м при ширине около 2 м. В ней можно различить два слоя: верхний, мощностью 15 см, и нижний – около 35 см, полого падающие к востоку. Породы верхнего слоя имеют буровато-серую окраску и порфировидную структуру. На средне-крупнозернистом фоне породы выделяются чёрные гнездообразные скопления поперечником 1.5–5 см. Они представлены сростками кристаллов тёмно-зелёной шпинели (плеонаста) размером 2–3.5 мм. Здесь же присутствуют чёрные сложной формы зёрна титаномагнетита до 1–1.5 мм. Такие порфировидные сростки шпинели и титаномагнетита занимают не более 1–3 % объёма породы, распределяясь в ней очень неравномерно.

Вкрапленность более мелких (0.05–0.8 мм) зёрен титаномагнетита рассредоточена более равномерно (рис. 3). Согласно подсчётам в полированных образцах по программе JMicrovision V.1.27, титаномагнетит занимает 10–11 об. % породы. Содержание TiO<sub>2</sub> в них составляет около 12 мас. % (см. табл. 2, ан. 8), а обычная для этого минерала примесь V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> присутствует в небольшом количестве (0.25 мас. %). Титаномагнетит выделяется как в межзерновом пространстве других минералов, так и слагает сростки с клинопироксеном, хёгбомитом, шпинелью и образует пойкилитовые включения в них (рис. 4а, 5а, б).

Основной объём породы (68–70 %) слагают буровато-зелёные удлинённые зёрна клинопироксена без отчётливых кристаллографических очертаний, с относительно невысокими цветами интерференции, косым погасанием и ортогональной системой трещин спайности. Соприкасаются зёрна друг с другом и окружающими минералами по резким неровным извилистым границам. Преобладающий их размер 1–5 мм, но встречаются и более мелкие (0.4–0.8 мм) кристаллы. Какой-либо преобладающей их ориентировки не отмечено. По составу (см. табл. 2, ан. 7) пироксен соответствует мало-

## Таблица 3

# Химический состав хёгбомита из шпинель-сапфириновых горнблендитов Тайгинского участка (мас. %)

Table 3

Chemical composition of högbomite from spinel-sapphirine hornblendites of the Tayginka area (wt. %)

№ обр.	. Сп-2 Сп-14											
№ ан.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
TiO <sub>2</sub>	7.04	6.20	6.38	6.05	6.10	5.98	6.30	6.91	6.50	6.77		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	62.71	64.26	63.79	64.58	62.90	63.01	62.68	63.84	64.74	63.67		
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.25	0.18	0.11	0.10	0.13	0.05	_	_	0.11	0.09		
FeO	14.04	13.69	15.14	14.25	17.88	19.13	17.86	14.79	14.26	15.89		
MgO	15.60	13.91	12.75	12.97	11.01	9.03	11.13	14.30	14.26	13.51		
Сумма	99.64	98.24	98.17	97.95	98.02	97.20	97.97	99.84	99.87	99.93		
	Кристаллохимические формулы (на 28 катионов)											
	1 (Mg Ee) (A1 Ti Ee Cr) O (OH)											
	2 (Mg Fe	$e^{-2.311} R.001 (18)$	(Al Ti	Cr ) C	(OH) ·							
	2. $(M_{5.148})$	2.843 $10.008$ $7.99$	) ( <b>A</b> 1 7	$158 \circ 1_{0.027} \circ 1_{20} \circ 1$	$_{38}(011)_2,$							
	3. $(Mg_{4.761}F)$	$e_{3.172} \Pi_{0.045} Cr_{0.0}$	$_{.022})_8(AI_{18.843})$	$(1_{1.157})_{20}O_{38}($	$OH)_2;$							
	4. $(Mg_{4.832}Fe_{2.979}Ti_{0.169}Cr_{0.020})_{8}(Al_{19.032}Ti_{0.968})_{20}O_{38}(OH)_{2};$											
	5. $(Mg_{4,169}Fe_{3,799}Cr_{0.026}Ti_{0.006})_{8}(Al_{19,032}Ti_{0.968})_{20}O_{38}(OH)_{2};$											
	6. $(Fe_{4.137}Mg_{3.480}Ti_{0.372}Cr_{0.010})_{7.999}(Al_{19.209}Ti_{0.791})_{20}O_{38}(OH)_2;$											
	7. (Mg <sub>4.216</sub> Fe	$e_{3.797})_{8.013}(Al_{18})$	.782 Ti <sub>1.204</sub> Fe <sub>0.0</sub>	$_{014})_{20}O_{38}(OH$	I) <sub>2</sub> ;							

8.  $(Mg_{5,228}Fe_{2,772})_{8}(Al_{18,463}Ti_{1,275}Fe_{0,262})_{20}O_{38}(OH)_{2};$ 

9.  $(Mg_{5,198}Fe_{2,802})_{8}(Al_{18,668}Ti_{1,196}Fe_{0,115}Cr_{0,021})_{20}O_{38}(OH)_{2};$ 

10.  $(Mg_{4.961}Fe_{3.038})_{7.999}(Al_{18.493}Ti_{1.254}Fe_{0.236}Cr_{0.017})_{20}O_{38}(OH)_{2}$ 

*Примечание*. 1–5, 7–10 – магнезиохёгбомит; 6 – феррохёгбомит. СЭМ РЭММА-202М, аналитик В.А. Котляров. *Note*. 1–5, 7–10 – magnesiohögbomite; 6 – ferrohögbomite. SEM REMMA–202M, analyst V.A. Kotlyarov.



железистому высокоглинозёмистому титанистому диопсиду (фассаиту) со значительной долей ионов Fe<sup>3+</sup> (85.60 % от суммарного Fe). По преобладающему минеральному составу описываемая порода диагностируется как титаномагнетитовый клинопироксенит.

*Рис. 3.* Титаномагнетит в клинопироксените (образец Сд-3-2).

Аншлиф, без анализатора. Ті-Мад – титаномагнетит, Срх – клинопироксен, Dol – доломит.

*Fig. 3.* Distribution of titanomagnetite (*white*) in clinopyroxenite (sample Sd-3-2).

Polished sample, reflected light. Ti-Mag – titanomagnetite, Cpx – clinopyroxene, Dol – dolomite.

Из крупнокристаллических выделений в клинопироксените на третьем месте по распространённости (3–5 об. %) находится хёгбомит. Его изометричные либо шестиугольные в сечении зёрна могут достигать 1–7 мм, хотя большинство его кристаллов имеют величину 0.3-0.8 мм. Почти чёрные, просвечивающие в краях коричневым цветом зёрна обладают смоляным блеском, раковистым изломом, иногда хорошо проявленными параллельными трещинами спайности. В шлифе они имеют буро-коричневый цвет, красно-зелёные цвета интерференции, прямое погасание. Магнезиохёгбомит образует сростки с кристаллами титаномагнетита и клинопироксена, имея с ними резкие, часто плавно изогнутые границы (рис. 4а-в). Вместе с тем, более часто хёгбомит слагает довольно крупные пойкокристаллы в зёрнах клинопироксена (см. рис. 4б, в; 5а). В магнезиохёгбомите нередко видны включения титаномагнетита (рис. 4б, в) и фторапатита. Отмечены случаи синтаксических сростков пластинчатых кристаллов магнезиохёгбомита со шпинелью (см. рис. 5б).

Примечательным является наличие в крупных кристаллах магнезиохёгбомита многочисленных белых округлых или полигональных включений до 0.1–0.8 мм, представляющих собой либо псевдоморфозы по кристаллам анортита, изредка встречающимся как реликтовые зёрна (см. рис. 4г; табл. 2, ан. 12), либо продукты заполнения газовых пузырей (миарол). Преобладающим минералом в миаролах является доломит в виде чечевицеобразных в сечении зёрен (см. рис. 5г), окаймляющих стенки пустот и сменяющихся к сердцевине бывших пус-тот пластинчатыми выделениями светлого голубоватого клинохлора, иногда с примесью волокон хризотила, а также мелкими бесцветными кристаллами фторапатита и титанита, прозрачного короткопризматического коричневатого циркона, жёлто-зелёного эпидота. Такие миаролы присутствуют во многих участках клинопироксенита, занимая местами 15-20 % его объёма, создавая необычную для глубинных пород миндалекаменную текстуру. Они соприкасаются со всеми первичными породообразующими минералами (пироксеном, титаномагнетитом, магнезиохёгбомитом, шпинелью) с резкими границами, повсеместно имея сглаженные и даже округлые формы. Во всех случаях характер их минерального заполнения аналогичен тому, что наблюдается в мелких округлых выделениях в кристаллах магнезиохёгбомита. Такая последовательность формирования минеральных агрегатов в округлых образованиях, признаки геометрического отбора при кристаллизации наиболее раннего доломитового агрегата на стенках пустот всё это говорит о существовании в материнском титаномагнетитовом клинопироксените первичных округлых незаполненных полостей (миарол) - свидетелей газонасыщенности расплава, из которого кристаллизовались минералы породы. Вероятно, об этом же говорит и присутствие синхронно росших с клинопироксеном пластинок клинтонита (см. рис. 5в). Клинтонит уже отмечался нами ранее (Кориневский и др., 2015) неподалёку в другом обнажении гранатовых клинопироксенитов.

Слой титаномагнетитового клинопироксенита с вкрапленностью магнезиохёгбомита подстилается слоем массивных неравнозернистых бурова-



*Рис.* 4. Форма зёрен магнезиохёгбомита в титаномагнетитовом клинопироксените (образец Сд-3-2).

Шлифы: а, б, г – без анализатора, в – с анализатором.

*Fig. 4.* Morphology of magnesiohögbomite grains in titanomagnetite clinopyroxenite (sample Sd-3-2).

Thin sections: a, 6,  $\Gamma$  – nicols ||, в – nicols ×.

МИНЕРАЛОГИЯ № 2 2016



*Рис.* 5. Структуры титаномагнетитового клинопироксенита (образец Сд-3-2).

См. текст. Шлифы, с анализатором. Ар – апатит, Cln – клинтонит.

*Fig.* 5. Textures of titanomagnetite clinopyroxenite (sample Sd-3-2).

For explanations, see text. This sections, nicols  $\times$ . Ap – apatite, Cln – clintonite.

то-серых эпидот-гранатовых клинопироксенитов. Их граница с вышележащими клинопироксенитами отчётливая, но нерезкая. Порода состоит преимущественно из плотно соприкасающихся зёрен клинопироксена величиной 1–3 мм. Значительную часть её объёма (25 %) слагает мелкозернистый агрегат полигональных зёрен зеленоватого граната (гроссуляр-андрадита), образующих в породе гнездовидные участки кристаллов среди агрегата клинопироксена (рис. 6). Вместе с гранатом столь же мелкие зёрна (0.1–0.5 мм) образуют эпидот в количестве до 5 % площади шлифа и титаномагнетит; пластинки клинтонита здесь более редки. В пироксенитах этого слоя магнезиохёгбомит не обнаружен.

Третьей разновидностью пород, в которых был обнаружен магнезиохёгбомит на западном побережье оз. Садок, является пироксен-амфиболовое анортитовое габбро, слагающее как и предыдущие породы, небольшой кластолит в серпентинитовом меланже. Магнезиохёгбомит здесь наблюдается в форме мелких гексагональных пластинчатых кристаллов (рис. 7), синтаксически срастающихся с более крупными зёрнами зелёной шпинели (плеонаста).

## Особенности состава и структуры магнезиохёгбомита

Достаточно большие размеры зёрен магнезиохёгбомита в описываемом титаномагнетитовом клинопироксените создали возможности для определения его структуры и некоторых физических свойств.

Из данных таблиц 3 и 4 следует, что хёгбомиты из пород Ильмено-Вишневогорского комплекса содержат значительно больше Mg, чем Fe. На этом основании их следует диагностировать как магнезиохёгбомиты (Armbruster, 2002). Магнезиохёгбомиты из горнблендитов и клинопироксенитов характеризуются отсутствием или крайне незначительными количествами ZnO, SnO, NiO (0.1-0.3 мас. %). В клинопироксенитах магнезиохёгбомит содержит заметно меньше ТіО, и больше MgO, чем этот же минерал в шпинель-сапфириновых горнблендитах. Железо находится в тех и других в сравнимых количествах. Хёгбомит из других местонахождений на Урале выделяется резким преобладанием в его составе Fe над Mg (см. табл. 1, ан. 4; 5-7, 9, 10), и его следует отнести к феррохёгбомиту. Многие из уральских феррохёгбомитов характеризуются присутствием заметных количеств Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и ZnO; один из анализов феррохёгбомита (см. табл. 1, ан. 3) содержит 11.12 мас. % ZnO и был назван «цинкохёгбомитом» (Молева, Мясников, 1952).

По данным рентгенограммы (табл. 5) магнезиохёгбомит относится к гексагональной сингонии и имеет параметры элементарной ячейки: a 5.715(5) Å, c 23.931(2) Å, V 677.01(4) Å<sup>3</sup>. На этом основании его можно отнести к политипу 2N3S (McKie, 1963; Нејпу, Armbruster, 2002), формульные количества которого рассчитываются на 28 катионов.

В результате компьютерного моделирования мёссбауэровских спектров магнезиохёгбомита и



*Рис. 6.* Агрегат полигональных зёрен граната (Grt) с эпидотом (Ер) из клинопироксенита Сд-3-1. Шлиф, без анализатора.

*Fig. 6.* Aggregate polygonal grains of garnet (Grt) and epidote (Ep) from clinopyroxenite. Thin section, nicols  $\parallel$ . Sample Sd-3-1.



*Рис.* 7. Ортогональная система синтаксических сростков магнезиохёгбомита (Hgb) и шпинели (Spl) в пироксен-амфиболовом анортитовом габбро (образец Сд-1-3). Шлиф, без анализатора.

*Fig.* 7. Orthogonal system of syntaxic aggregates of magnesiohögbomite (Hgb) and spinel (Spl) in pyroxene-amphibole gabbro (sample Sd-1-3). Thin section, nicols  $\parallel$ .

Таблица 4

Химический состав магнезиохёгбомита из титаномагнетитового клинопироксенита (образец Сд-3-2) с западного побережья оз. Садок (мас. %)

Table 4

Chemical composition of magnesiohögbomite from titanomagnetite clinopyroxenite (sample Sd-3-2) from the western cost of lake Sadok (wt. %)

№ зёрен	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
TiO <sub>2</sub>	5.79	5.70	5.53	5.59	5.76	5.77	5.38	5.52	5.65	5.50			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	62.88	2.88     61.74     61.32     62.08     61.82     62.38     62.96     62.35     63.04     64.32       0.22     0.22     0.22     0.22     0.22     0.14     0.17     0.14     0.14											
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	- 0.23 0.20 - 0.27 0.14 0.17 0.18 0.14												
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.88* 11.81* 12.27* 11.91* 12.27* 11.68* 11.21* 11.48* 10.79* 11.45*												
FeO	O 3.94* 4.28* 4.45* 4.31* 4.45* 4.23* 4.07* 4.17* 3.91* 4.1												
MnO	0.36	0.60	0.72	0.28	0.37	0.52	0.41	0.32	0.41	0.23			
MgO	14.99	15.08	14.77	15.06	14.47	14.60	15.29	15.47	15.67	14.66			
Сумма	98.84	99.44	99.26	99.23	99.14	99.45	99.46	99.48	99.65	100.44			
f	0.34	0.36	0.37	0.36	0.37	0.36	0.34	0.34	0.33	0.36			
Кристаллохимические формулы (на 28 катионов)													
$1. (Mg_{5.554}Fe^{3+}_{1.551}Fe^{2+}_{0.819}Mn_{0.076})_{8}(AL_{18.432}Ti_{1.083}Fe^{3+}_{0.485})_{20}O_{38}(OH)_{2};$													
2. $(Mg_{5583}Fe^{3+}_{1400}Fe^{2+}_{0889}Mn_{0.126})_{7.998}(AL_{18.082}Ti_{1.065}Fe^{3+}_{0.808}Cr_{0.045})_{20}O_{38}(OH)_{2};$													
3. (Mg <sub>5.49</sub>	$3. (Mg_{5.494}Fe^{3+}_{1.424}Fe^{2+}_{0.929}Mn_{0.152})_{7.999}(AL_{18.042}Ti_{1.038}Fe^{3+}_{0.881}Cr_{0.039})_{20}O_{38}(OH)_{2};$												
4. $(Mg_{5579}Fe^{3+}_{1466}Fe^{2+}_{0,896}Mn_{0,050})_8(AL_{18193}Ti_{1,045}Fe^{3+}_{0,762})_{20}O_{38}(OH)_2;$													
5. (Mg <sub>5.38</sub>	5. $(Mg_{5,280}Fe^{3+})_{401}Fe^{2+}_{0,020}Mn_{0,070})_{8}(AL_{18,21}Ti_{1,02}Fe^{3+}_{0,706})_{20}O_{28}(OH)_{2};$												
6. $(Mg_{5,410}Fe^{3+}_{1,601}Fe^{2+}_{0,800}Mn_{0,100})_{7,000}(AL_{18,294}Ti_{1,070}Fe^{3+}_{0,504}Cr_{0,052})_{20}O_{38}(OH)_{3};$													
7. $(Mg_{5,670}Fe^{3+})_{446}Fe^{2+})_{60}Mn_{0.08c})_{8,000}(AL_{18,226}Ti_{0.000}Fe^{3+})_{6620}Cr_{0.027})_{20}O_{28}(OH)_{2};$													
8. $(Mg_{5.701}Fe^{3+}_{1.370}Fe^{2+}_{0.862}Mn_{0.0.067})_8(AL_{18.175}Ti_{1.026}Fe^{3+}_{0.766}Cr_{0.033})_{20}O_{38}(OH)_2;$													
9. $(Mg_{5.746}Fe^{3+}_{1.363}Fe^{2+}_{0.805}Mn_{0.085})_{7.999}(AL_{18.285}Ti_{1.045}Fe^{3+}_{0.635}Cr_{0.035})_{20}O_{38}(OH)_{2};$													
10. (Mg <sub>5</sub>	$_{353}$ Fe <sup>3+</sup> 1.732	$Fe^{2+}_{0.848}M$	$n_{0.048}Zn_{0.01}$	<sub>8</sub> ) <sub>7,999</sub> (AL <sub>1</sub> )	<sub>8.580</sub> Ti <sub>1.014</sub> F	$e^{3+}_{0.379}Cr_0$	$_{027})_{20}O_{38}(C$	$(DH)_2$					
	<u>полира</u> 1(			Mag % 7	$n \cap f$ n		отт (Fe/(F	$\tilde{c}$	ובים אבי	414 202			

*Примечание.* В анализе 10 определено 0.10 мас. % ZnO; f – железистость (Fe/(Fe+Mg). CЭМ РЭММА-202 М, аналитик В.А. Котляров. \*)Fe<sup>2+</sup> и Fe<sup>3+</sup> – по данным ЯГР-спектроскопии, аналитик А.Б. Миронов.

*Note.* Analysis 10 contains 0.10 wt. % ZnO; f - iron mole fraction (Fe/(Fe+Mg). SEM REMMA-202M, analyst V.A. Kotlyarov. \*) Fe<sup>2+</sup>  $\mu$  Fe<sup>3+</sup> – according to Mössbauer spectroscopy, analyst A.B. Mironov.

# Таблица 5 Межплоскостные расстояния магнезиохёгбомита – 2N3S из титаномагнетитового клинопироксенита Сд-3-2

Table 5

XRD pattern of magnesiohögbomite – 2*N*3*S* from titanomagnetite clinopyroxenite Sd-3-2

№ лин.	d, Å	Ι	hkl	№ лин.	d, Å	Ι	hkl
1	4.61	26	102	14	1.982	40	207
2	4.17	14	103	15	1.881	9	208
3	3.37	26	105	16	1.734	2	215
4	3.04	13	106	17	1.688	5	216
5	2.867	27	110	18	1.655	4	301
6	2.744	53	107	19	1.629	14	217
7	2.492	62	108	20	1.602	10	2.0.11
8	2.463	15	200	21	1.573	29	1.0.14
9	2.433	100	202	22	1.558	21	305
10	2.364	6	203	23	1.519	25	219
11	2.279	15	109	24	1.443	53	0.0.16
12	2.186	5	205	25	1.434	44	1.1.14
13	2.084	42	206				

Примечание. ДРОН-2.0 с Си-анодом, графитовый монохроматор, скорость съёмки 0.02 <sup>°</sup>/мин, внутренний эталон – кварц, диапазон съёмки 4–70°. Аналитики П.В. Хворов, Е.Д. Зенович.

*Note.* Diffractometer DRON-2.0 with Cu-anode, graphite monochromator, step of recording 0.02°, internal standard of quartz, band of recording 4–70°. Analysts P.V. Khvorov and E.D. Zenovich.

фассаита (образец Сд-3-2, табл. 6) была получена трёхдублетная модель для того и другого (табл. 6, рис. 8). В фассаите ионы Fe<sup>2+</sup> занимают 2 октаэдрические позиции M1 и M2 с различной степенью искажения полиэдра, а ионы Fe<sup>3+</sup> предпочитают положение М1. В исследованном образце хёгбомита получена следующая модель: 1 дублет от Fe<sup>3+</sup> в октаэдре и 2 дублета (а) и (b) от Fe<sup>2+</sup> в тетраэдре с различной конфигурацией катионов во второй координационной сфере. Характерной особенностью является высокое содержание Fe<sup>3+</sup> (71.3 % от суммарного) в магнезиохёгбомите. Этим же методом установлено чрезвычайно высокое относительное содержание ионов Fe<sup>3+</sup> (85.6 %) в фассаите из вмещающего клинопироксенита. Это даёт возможность скорректировать данные микрозондового анализа магнезиохёгбомита и фассаита (см. табл. 2 и 4).

Впервые получен инфракрасный спектр уральского магнезиохёгбомита (рис. 9). В области



*Рис.* 8. Мёссбауэровский спектр магнезиохёгбомита (образец Сд-3-2).

*Fig. 8.* Mössbauer spectrum of magnesiohögbomite (sample Sd-3-2).

основных колебаний характеры две полосы 511 см<sup>-1</sup> и 675 см<sup>-1</sup>, связанные с колебаниями кислородно-катионной решётки. Спектр пробы СД-3-2 отличается от эталонного спектра наличием дополнительных полос в области 440 см-1, 536 см-1 и 630 см-1. Их появление можно объяснить несколькими причинами: во-первых, наличием микросростков магнезиохёгбомита и минералов из группы шпинели; второй причиной может быть высокая степень упорядоченности катионной решётки, благодаря чему полосы лучше разрешились по сравнению с эталоном. Спектр пробы СД-3-2 в «водной» области отличается наличием широкой полосы с максимумом 3355 см-1, причём отсутствует полоса в области 1630 см-1, относящаяся к деформационным колебаниям связи О-Н в молекулах воды. Природа появления полосы 3355 см<sup>-1</sup> объясняется наличием ОН-групп в структуре магнезиохёгбомита, ширина и низкочастотный максимум полосы указывают на то, что ОН-группы локализованы вблизи крупных катионов (Ti<sup>3+</sup>, Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup>) и не имеют строгой позиции в кристаллической решетке. В области 2800-4000 см-1 спектр эталонного феррохёгбомита (Chukanov, 2014) из Николае-Максимиллиановской копи на Южном Урале имеет слабо выраженную полосу поглощения ~ 3300 см⁻¹.

## Таблица б

# Параметры мёссбауэровских спектров магнезиохёгбомита и фассаита из титаномагнетитового клинопироксенита (образец Сд-3-2)

Table 6

The parameters of Mössbauer spectrum of magnesiohögbomite and fassaite from the titanomagnetite clinopyroxenites (sample Sd-3-2)

Позиции ионов	$Fe^{2+}(a)$				${\rm Fe}^{2+}({\rm b})$				Fe <sup>3+</sup>			
Параметры	IS	QS	HW	S	IS	QS	HW	S	IS	QS	HW	S
Магнезиохёгбомит	1.06	2.00	0.48	9.16	1.16	1.01	0.53	19.55	0.58	0.66	0.43	71.29
ф	Fe <sup>2+</sup> (M1)				Fe <sup>2+</sup> (M2)				Fe <sup>3+</sup> (M1)			
Фассаит	1.53	2.21	0.31	7.23	1.29	2.10	0.25	7.17	0.63	0.96	0.60	85.60

*Примечание*. IS – изомерный сдвиг относительно нитропруссида натрия (мм/с); QS – квадрупольное расщепление (мм/с); HW – полуширина линии (мм/с); S – площадь соответствующего дублета в спектре (%). Спектрометр SM-2201, аналитик А.Б. Миронов.

*Note.* IS – isomer shift relative to sodium nitroprusside (mm/s); QS – quadrupole expansion (mm/s); HW – half-width of line (mm/s); S – area of the doublet in the spectrum (%). Spectrometer SM-2201, analyst A.B. Mironov.



Рис. 9. ИК-спектры хёгбомитов Урала: а – в области основных колебаний; б – в «водной» области.

1 – феррохёгбомит из Николае-Максимилиановской копи (кристаллы из друз с клинохлором), Южный Урал (Chukanov, 2014); 2 – магнезиохёгбомит из клинопироксенита с побережья оз. Садок, Ильмено-Вишневогорский комплекс (образец Сд-3-2).

*Fig. 9.* Infrared spectra of högbomites of the Urals: a - fundamental vibration range; 6 - range of water vibration.

1 – ferrohögbomite from the Nikolay-Maksimilianovskaya pit (crystals from druses with clinochlore), South Urals (Chukanov, 2014); 2 – magnesiohögbomite from clinopyroxenite, Lake Sadok, Ilmeno-Vishnevogorsky complex (sample Sd-3-2).

#### Заключение

Хёгбомит на Урале обнаружен в разнообразных кристаллических породах – пироксен-амфиболовых и амфиболовых габбро («амфиболитах»), ильменит-магнетитовых рудах, карбонатитах, горнблендитах, клинопироксенитах, серпентинитах. Большинство находок происходит из районов западного склона Южного Урала. Наши находки для Ильмено-Вишневогорского комплекса являются первыми. Хёгбомиты из местонахождений западного склона по современной классификации в большинстве своём являются феррохёгбомитами, тогда как в Ильмено-Вишневогорском комплексе они диагностированы как магнезиохёгбомиты.

Геологическое положение пород, в которых на Урале обнаружен магнезиохёгбомит, и его соотношения с другими минералами свидетельствуют о наиболее вероятном магматическом происхождении этого минерала. МАГНЕЗИОХЁГБОМИТ ИЗ ИЛЬМЕНО-ВИШНЕВОГОРСКОГО КОМПЛЕКСА

Благодарности. Авторы выражают признательность за проведённые аналитические работы М.Н. Малярёнок, Т.В. Семёновой, П.В. Хворову, Е.Д. Зенович, а за подготовку препаратов к исследованиям – Р.А. Аюпову, Н.П. Ивановой, И.В. Кислюк, Е.А. Зориной.

Отдельную благодарность авторы выражают Н.В. Чуканову за обсуждение и интерпретацию инфракрасных спектров.

### Литература

Бочарникова Т.Д., Прибавкин С.В., Холоднов В.В., Воронина Л.К. Хёгбомит из ильменитмагнетитовых руд Кусинского массива (Южный Урал) // Зап. РМО. 2005. № 2. С. 84–90.

Иванов О.К. Хёгбомит // Минералогия Урала. Оксиды и гидроксиды. Часть 1. Миасс– Екатеринбург: УрО РАН, 2000. С. 100–103.

*Карпова О.В.* Титаномагнетитовые руды Южного Урала. М.: Наука, 1974. 152 с.

Кобяшев Ю.С., Никандров С.Н., Вализер П.М. Минералы Ильменских гор, 2000 г. Миасс: ИГЗ УрО РАН, 2000. 118 с.

Колисниченко С.В., Попов В.А., Епанчинцев С.Г., Кузнецов А.М. Все минералы Южного Урала. Минералы Челябинской области. Энциклопедия уральского камня. Челябинск: «Санарка», 2014. 624 с.

Кориневский В.Г., Кориневский Е.В. Фрагменты пород основания земной коры в структуре Ильмено-Вишневогорского комплекса // Уральский геологический журнал. 2014. № 1 (97). С. 68–72. Кориневский В.Г., Котляров В.А., Кориневский Е.В., Штенберг М.В., Лебедева С.М. Клинтонит Ca(Mg,Al,Fe)<sub>3</sub>[Al<sub>3</sub>SiO<sub>10</sub>](OH)<sub>2</sub> из Ильмено-Вишневогорского комплекса Южного Урала // Минералогия. 2015. № 3. С. 12–22.

Левин В.Я., Роненсон Б.М., Самков В.С., Левина И.А., Сергеев Н.С., Киселёв А.П. Щелочнокарбонатитовые комплексы Урала. Екатеринбург: Уралгеолком, 1997. 274 с.

Молева В.А., Мясников В.С. О хёгбомите и его разновидности цинкхёгбомите // Докл. АН СССР. 1952. Т. 83. № 5. С. 733–735.

Попов В.А. Минералогические исследования скарнов и карбонатитов Ахматовской копи // Уральский минералогический сборник № 17. Миасс-Екатеринбург: УрО РАН, 2010. С. 109–117.

Феритатер Г.Б., Холоднов В.В., Бородина Н.С. Условия формирования и генезис рифейских ильменит-титаномагнетитовых месторождений Урала // Геология рудн. месторождений. 2001. Т. 43. № 2. С. 112–128.

*Armbruster T.* Revised nomenclature of högbomite, nigerite, and taaffeite minerals // Eur. J. Mineral. 2002. Vol. 14. P. 389–395.

*Chukanov N.V.* Infrared spectra of mineral species. Extended library. Dordrecht: Springer Netherlands: Imprint: Springer, 2014. 1726 p.

*Hejny C., Armbruster T.* Polysomatism in högbomite: the crystal structures of 10T, 12N, 14T, and 24R polysomes // Am. Mineral. 2002. Vol. 87. P. 277–292.

*McKie D.* The högbomite polytypes // Mineral. Mag. 1963. Vol. 33. P. 563–580.

Поступила в редакцию 20 мая 2016 г.