

УДК 552.111:553.52(470.5)

DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-4-533-557

Состав минералов (апатит, магнетит, ильменит и др.) как отражение процессов формирования рудных тел и расслоенности в Кусинской габбровой интрузии (Южный Урал)

© 2019 г. Т. Д. Бочарникова, В. В. Холоднов, Е. С. Шагалов

Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15,
e-mail: Bocharnikova@igg.uran.ru

Поступила в редакцию 26.07.2018 г., принята к печати 27.11.2018 г.

Объект исследования. В статье приведены результаты минералого-петрологического и геохимического исследования рудных зон и руд Кусинского ильменит-магнетитового месторождения, расположенного в пределах одноименного расслоенного габбрового массива, представляющего собой пластовую залежь. Рудные тела залегают на разных горизонтах интрузии, среди расслоенных апогабброидных амфиболитов различной основности. Исследован состав галогенов (Cl, F) в сосуществующих флюид-содержащих минералах (апатит, амфибол, ставролит), а также химический состав амфиболов из околорудных пород. **Материалы и методы.** Микронзондовый анализ состава минералов выполнен в полированных шлифах на электронно-зондовом микроанализаторе JXA-5. Содержания петрогенных и микроэлементов (методы XRF, ICP-MS) в породах и рудах определены в лаборатории физико-химических методов исследования ИГГ УрО РАН. **Результаты.** Установлено, что содержание Cl и F в апатите, амфиболе и ставролите, а также химический состав руд и слагающих их ильменита, магнетита и хёгбомита, зависят от положения рудных тел в разрезе интрузии. Апатиты, амфиболы и ставролиты из околорудных пород центральной части месторождения более обогащены хлором, чем эти же минералы из рудных зон приконтактных частей интрузии. В центральной рудной зоне с максимально высоким содержанием Cl, сформированы самые крупные рудные тела, в которых руды, а также магнетит в их составе, содержат больше Fe₂O₃, Cr и V. **Заключение.** Унаследованность отношений TiO₂/FeO в дупироксеновом габбро, в массивных магнетит-ильменитовых рудах и в околорудных хлорит-гранат-амфиболовых породах, а также особенности распределения галогенов в апатите дупироксенового габбро, указывают на единый магматический источник этих образований. Изучение состава галогенов во флюид-содержащих минералах в вертикальном разрезе интрузии показало, что еще на магматическом уровне произошло расслоение галоген-составляющей флюидной фазы (разное соотношение Cl и F), с участием которой в дальнейшем происходило формирование, как петрологической расслоенности, так и рудных зон с различной концентрацией Cl в рудообразующем флюиде и как следствие – образование различных по составу руд и слагающих их минералов.

Ключевые слова: Кусинское ильменит-магнетитовое месторождение (интрузия), расслоенность, флюид, галогены, геохимия, апатит, ильменит, магнетит, хёгбомит

Composition of minerals (apatite, magnenite, ilmenite and others) as an index of conditions of layered massive ore formation in the laminated gabbro of Kusa intrusion (the Southern Urals)

Tatiana D. Bocharnikova, Vladimir V. Kholodnov, Yevgeny S. Shagalov

A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB of RAS, 15 Acad. Vonsovsky st., Ekaterinburg, 620016 Russia,
e-mail: Bocharnikova@igg.uran.ru

Received 26.07.018, accepted 27.11.2018

Research subject. In this research, we carried out a series of mineralogical, petrological and geochemical studies to investigate ore zones present in the Kusa ilmenite-magnetite deposit located within the boundaries of a similarly-named laminated gabbro massif. Here, ore bodies occur at various intrusion horizons among laminated apogabbroid amphibolites of a different basicity. In the intrusion section, the composition of halogens (Cl, F) in co-existing fluid-bearing minerals (apatite, amphibole, staurolite) was analyzed. **Materials and methods.** In order to investigate the composition of mineral samples, their polished sections were examined using an electronic-microprobe analyzer JXA-5. The content of petrogenic and microele-

Для цитирования: Бочарникова Т.Д., Холоднов В.В., Шагалов Е.С. (2019) Состав минералов (апатит, магнетит, ильменит и др.) как отражение процессов формирования рудных тел и расслоенности в Кусинской габбровой интрузии (Южный Урал). *Литосфера*, 19(4), 533-557. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-4-533-557

For citation: Bocharnikova T.D., Kholodnov V.V., Shagalov Ye.S. (2019) Composition of minerals (apatite, magnenite, ilmenite and others) as an index of conditions of layered massive ore formation in the laminated gabbro of Kusa intrusion (the Southern Urals). *Litosfera*, 19(4), 533-557. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-4-533-557

ment components (CRF and ICP-MS methods) in the rock and ore samples was determined using the facilities of the Laboratory of Physical and Chemical methods, UBRAS Institute of Geology and Geochemistry. *Results.* It is established that the content of Cl and F in the apatite, amphibole and staurolite under study, as well as the chemical composition of ilmenite, magnetite, and hombombite components, depend on the position of the ore bodies in the intrusion. Thus, the apatites from the near-ore rocks in the central part of the deposit showed the highest Cl concentrations of up to 4.1%, while those located in the near-contact parts of the intrusion demonstrated a much lower Cl content of 2%. The central ore-bearing zone having the maximal Cl content features the largest formation of ore bodies, which (including magnetite) contain higher amounts of Fe₂O₃, Cr and V. The presence of fluid-bearing minerals (apatite, scapolite, etc.) with high chlorine concentrations of up to 2.44% in this deposit is established. *Conclusions.* The identified peculiarities of halogen distribution in the apatite of bipyroxene gabbro, as well as the inheritance of relations TiO₂/FeO in bipyroxene gabbro, in massive magnetite-ilmenite ores and in near-ore rocks point to a single magmatic source of these formations.

Keywords: *the Kusa ilmenite-magnetite deposit, lamination, fluid, halogens, geochemistry, apatite, ilmenite, magnetite, hōgbomite*

Acknowledgements

Work is performed under the theme 0393-2016-0020 state task IGG UB RAS, № state. reg. АНН-А18-118052590029-6, and the project of UB RAS (0393-2018-0027), № state. reg. АААН-А18-118052590034-0.

ВВЕДЕНИЕ

Механизмы и условия формирования крупных пластообразных рудных залежей в расслоенных габброидных комплексах издавна интересуют специалистов в области геологии рудных месторождений и петрологии рудоносных магматических пород. Одни исследователи полагали, что образование рудных тел в среднерифейских габброидных массивах Башкирского мегантиклинория Южно-Урала связано с внедрением в уже раскристаллизованные породы остаточной богатой летучими рудной магмы [Малышев и др., 1934; Титаномагнетитовые месторождения..., 1936; и др.]. Другие рассматривали руды как кумулятивные титаномагнетитовые, преобразованные в сегрегационные ильменит-магнетитовые руды в результате более позднего регионального метаморфизма или воздействия гранитных интрузий [Мясников, 1959; и др.].

Представление о том, что расслоенное строение Кусинской интрузии, с включенными в нее пластами массивных магнетит-ильменитовых руд, является следствием магматической дифференциации, было обосновано в работе [Штейнберг и др., 1959]. Впервые типичные признаки расслоения в рудоносных интрузиях Кусинско-Копанской группы, а именно: присутствие скрытой грубой и ритмической расслоенности с многократным чередованием габброидов от меланократовых до лейкократовых по составу, а также наличие трахитоидных текстур в породах и приуроченность оруденения к определенным горизонтам в разрезе интрузии, были отмечены и охарактеризованы в работах [Карпова, 1974; Формации..., 1984; Алексеев и др., 1992, 2000].

Петрохимическая, геохимическая и минералогическая характеристики ритмической расслоенности в отдельных рудоносных массивах кусинско-копанского комплекса (Кусинском и Медведевском) была позднее дана в работах [Холоднов и др., 2002, 2015, 2016; Бочарникова и др., 2003]. На-

личие скрытой расслоенности в строении массивов кусинско-копанского комплекса охарактеризовано в работах [Ферштатер и др., 2001, 2005; и др.]. Здесь показано, что с запада на восток (от лежачего бока к висячему) в массивах этого комплекса в составе клинопироксена закономерно снижаются магнезиальность и содержание кальция, растет железистость при одновременном снижении степени окисленности железа. Этот тренд изменения в составе клинопироксена совпадает с трендом изменения состава пироксенов вверх по разрезам (от глубоких горизонтов к феррогаббро) Бушвельдского и Скаергаардского расслоенных интрузивов [Уэджер, Браун, 1970]. В Медведевском массиве (кусинско-копанского комплекса) уменьшение магнезиальности клинопироксена вверх по разрезу происходит синхронно с уменьшением магнезиальности оливина (от 0.90 до 0.64) [Ферштатер и др., 2001]. В этом же направлении снижается основность плагиоклаза от № 65 до № 50, а в титаномагнетитах вверх по разрезу интрузии растет содержание TiO₂ от 6–8 до 10–15 мас. % [Фоминных, 1968]. В Копанском массиве, по данным [Кравцова, 1963], наиболее высокую основность имеют плагиоклазы в центральной части массива № 55–62, в западной части у основания интрузии плагиоклаз соответствует № 48–55 и в восточной части состав плагиоклаза – № 35–46. В рудных телах вверх по разрезу в титаномагнетитах наблюдается увеличение концентраций Ti, Fe³⁺, Al и уменьшение содержаний Mg и Fe [Иванов, 2004]. Это соответствует данным о проявлении скрытой расслоенности в рудных телах известного Бушвельдского расслоенного массива. Дж. Уиллемз [1973], изучая магнетитовые руды этого расслоенного массива, показал, что вверх по разрезу рудных пластов в титаномагнетитах возрастает концентрация TiO₂ (от 12.2–13.9 до 20%) и уменьшаются содержания V₂O₅ (от 2.2 до 0.4%). В габброидах рудоносного кусинско-копанского комплекса, а именно в вертикальном разрезе Мед-

ведевского и Копанского массивов, наблюдается закономерная смена снизу вверх вкрапленного титаномагнетитового оруденения существенно ильменитовым. Такая же картина прослеживается и в пределах отдельных ритмов. В основании ритмов, в меланократовых породах, локализуются титаномагнетитовые руды, а в верхней части, в лейкократовых габбро и анортозитах, – преимущественно ильменитовое оруденение [Формации..., 1984]. Соответственно, вверх по разрезу массивов растет Ti/Fe отношение. Одновременно с титаном в породах и рудах снизу вверх растет содержание фосфора и количество апатита, а в апатитах при этом нарастает и содержание фтора [Карпова, 1974; Бочарникова и др., 2003; Холоднов и др., 2016].

Как показали проведенные в последние годы исследования [Холоднов и др., 2015], на характер, степень и направление эволюции среднерифейских рудоносных базитовых интрузий кусинско-копанского комплекса большое влияние оказали летучие элементы (H₂O, F и Cl). Они играли важную роль в рудообразовании, влияя на специфику рудоносности интрузий, формирующихся в условиях различных фаций глубинности, т.е. при различных РТХ-параметрах. Особое значение галогенов при формировании разных рудоносных магматических комплексов на Урале убедительно показано в работе [Холоднов, Бушляков, 2002].

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основная цель данной работы – получение новых данных, которые позволили бы приблизиться к пониманию механизма формирования крупных пластов массивных магнетит-ильменитовых руд в расслоенных габброидах Кусинской интрузии.

В связи с этим проведено детальное изучение:

1) состава галогенов (Cl, F) в гидроксилсодержащих минералах (сосуществующих апатите, амфиболе и ставролите) из околорудных хлорит-гранат-амфиболовых пород, вмещающих тела массивных руд на разных горизонтах расслоенной интрузии (подошва, у западного контакта – центральная (верхняя) часть интрузии – кровля, у восточного контакта);

2) химического состава руд в разрезе интрузии, а также состава сосуществующих ильменита и магнетита, хёгбомита и шпинели в рудах и в пределах одного конкретного рудного тела.

При этом планируется получить ответы на следующие вопросы:

1) как меняется состав галогенсодержащей флюидной фазы (соотношение Cl и F) в околорудных породах в зависимости от позиции рудных зон в вертикальном разрезе интрузии;

2) как взаимосвязано соотношение галогенов во флюиде с химическим и минеральным составом массивных руд на разных горизонтах интрузии;

3) как меняется соотношение галогенов во флюиде при формировании массивных и вкрапленных руд.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ И СТРОЕНИЕ КУСИНСКОГО МАССИВА

Кусинско-копанский комплекс расположен в пределах Башкирского мегантиклинория Южного Урала. Он представлен полосой расслоенных габброидов в виде цепочки массивов, субмеридионально вытянутых почти на 70 км и приуроченных к зоне Зюраткульского глубинного разлома. Цепочка с севера на юг представлена Кусинским, Медведевским, Копанским и Маткальским габбровыми массивами. По времени формирования, согласно данным изотопного датирования, все массивы укладываются в один диапазон – 1385–1395 млн лет [Холоднов и др., 2010]. Восточнее габброидов тянется полоса гранитоидов Губенского и Рябиновского массивов.

Кусинская интрузия вытянута с севера на юг и падает на юго-восток под углом в среднем около 45°. Она сильно деформирована и под воздействием мощных тектонических напряжений приобрела сложную изогнутую форму и блоковое строение. Со стороны висячего бока (восточный контакт) залегают гранитоиды Губенского массива. Со стороны лежащего бока (западный контакт) залегают протерозойские породы – доломиты Саткинской свиты (R₁).

Кусинское месторождение магнетит-ильменитовых руд находится в пределах одноименного расслоенного габбрового массива, представляющего собой на дневной поверхности пластовую интрузивную залежь, мощность которой изменяется от десятков метров на флангах до 800 м в центре (рис. 1). Сам массив в пределах месторождения сложен переслаиванием апогабброидных амфиболитов различной основности, включающих пласты мономинеральных апопироксенитовых амфиболитов. Сохранились участки, сложенные и довольно свежим дупироксеновым габбро. Рудовмещающие породы – это расслоенные роговообманковые габброиды, представленные чередованием слоев пород лейкократового, мезократового и меланократового облика, обусловленного различным содержанием роговой обманки (от 5–10% в анортозитах до 80–90% в горнблендитах) [Фоминых, Андреев, 1970; Карпова, 1974; Ферштатер и др., 2001; Холоднов и др., 2002; и др.].

В строении Кусинского массива выделяются два блока. **Северо-западный блок** – это выходящая на поверхность нижняя, приподошвенная часть Кусинского массива, контактирующая с доломитами нижнего рифея. Блок сложен роговообманковыми габбро и габбро-амфиболитами, а также фрагментом частично амфиболитизированного дупироксенового габбро. В этом блоке сосредоточены все массивные магнетит-ильменитовые руды, представляющие Кусинское месторождение. Условия форми-

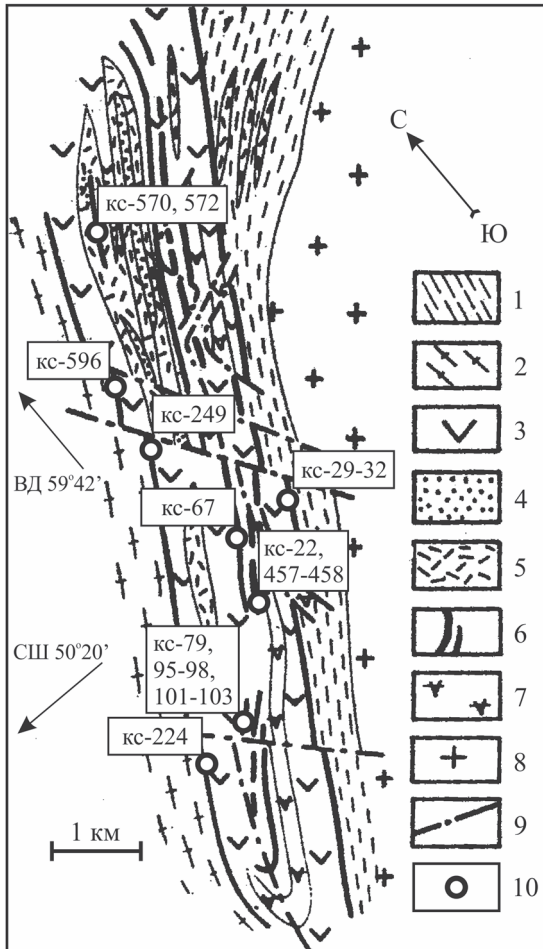


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Кузинского месторождения [Формации..., 1984].

1 – южнокузинская толща амфиболитов, 2 – протерозойские породы лежащего бока, 3 – кузинская толща амфиболитов, 4 – густовкрапленные ильменит-титаномагнетитовые руды в амфиболитах, 5 – вкрапленная ильменит-титаномагнетитовая руда в амфиболитах, 6 – тела сплошных ильмено-титаномагнетитовых руд, 7 – габбро-амфиболиты, 8 – губенские гранито-гнейсы, 9 – тектонические нарушения, 10 – места отбора образцов.

Fig. 1. Schematic geological map of the Kusa deposit [Formations..., 1984].

1 – South-Kusinskaya series of amphibolites, 2 – Proterozoic rocks of a lying wall, 3 – Kusinskaya series of amphibolites, 4 – thickly impregnated ilmenite-titanomagnetite ores in amphibolites, 5 – impregnated ilmenite-titanomagnetite ore in amphibolites, 6 – bodies of ilmeno-titanomagnetite ores, 7 – gabbro-amphibolites, 8 – gubensky granite-gneisses, 9 – tectonic dislocations, 10 – a places of sampling.

рования Кузинского месторождения охарактеризованы в работе [Ферштатер и др., 2001], где показано, что образование происходило при высоком водном и общем давлении ($P_{H_2O} = 6-7$ кбар и температуре $600-1000^\circ\text{C}$, $\lg f_{O_2} = 18-11$). Юго-восточный мегаблок расположен в 1.4 км от месторожде-

ния, где скважиной № 2 вскрыт полный разрез Кузинского массива общей мощностью около 700 м. Здесь он перекрыт гнейсами Кувашской свиты (R_2). Нижняя половина массива сложена зоной ильменитового двухпироксенового габбро, а верхняя – ритмически расслоенной серией габброидов [Алексеев и др., 1992, 2000]. Оба блока характеризуются присутствием габброидов с ритмической расслоенностью, представленной многократным чередованием ритмов, сложенных от рудных меланогаббро и горнблендитов в основании ритма до лейкократового габбро и анортозитов вверх. Расслоенность согласна контактам интрузии. Согласно расслоенности ориентирована и трахитоидность в двухпироксеновом габбро и габбро-амфиболитах.

В первом блоке (Кузинское месторождение) в разрезе по петрохимическим характеристикам пород [Холоднов и др., 2002] наблюдается чередование высокотитанистых и низкотитанистых ритмов. Первые отмечаются в неизменном двухпироксеновом габбро, а вторые – в расслоенной *Amf*-габбро-анортозитовой (с горнблендитами и метапироксенитами) серии, фрагменты которой хорошо сохранились в интервалах между первой, второй и третьей рудными залежами. Наличие чередования высоко- и низкотитанистых ритмов является типичным и для других рудоносных расслоенных интрузий. В частности, такое чередование характерно для Чинейского расслоенного массива [Гонгальский, Кривоуцкая, 1993].

На Кузинском месторождении в основании главных ритмов среди меланократовых амфиболитов располагаются рудные залежи [Холоднов и др., 2002], самые крупные из которых в центральной части интрузии уже отработаны.

Во всех ритмично расслоенных разрезах интрузии верхняя, лейкократовая, часть ритмов характеризуются значительно более высокими содержаниями в породах SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Na_2O , K_2O и P_2O_5 , а нижняя, меланократовая (с вкрапленным титаномагнетитовым и ильменитовым оруденением), – TiO_2 , FeO , MnO и MgO . Унаследованность отношений Ti/Fe в ритмично расслоенных габброидах и сплошных рудах месторождения указывает на единый магматический источник рудных элементов.

Изучение ритмично-расслоенных разрезов на более южном Медведевском месторождении показало [Холоднов и др., 2012], что составы апатита и рудных минералов отражают направленную кристаллизацию пород и вкрапленных руд в макро- и микроритмах снизу вверх: от более высокотемпературных минеральных парагенезисов, формирующих меланократовые породы с густовкрапленным магнетит-ильменитовым оруденением, к более низкотемпературным лейкогаббро и анортозитам. Во всех ритмах вверх по разрезу в составе апатита происходит направленный рост содержания фтора. При этом в микроритмах эта тенденция многократ-

но повторяется, свидетельствуя о том, что формирование всех микроритмов в исследованных разрезах происходило одновременно. Ритмичное нарастание содержания фтора в апатитах вверх по разрезу в каждом из ритмов коррелируется с эволюцией в составе пород – с ростом вверх по разрезу содержания щелочей, а также SiO_2 , Al_2O_3 , P_2O_5 , т.е. наиболее легкоплавких и легколетучих элементов, и с накоплением в нижней части ритмов TiO_2 , FeO , MnO и MgO . Теоретический анализ такой направленной снизу вверх кристаллизации в ритмично-расслоенных магматических сериях дан в работах [Шарков, 2006; Гонгальский и др., 2008].

Массивные ильменит-магнетитовые руды Кусинского месторождения – это рудные пласты с четкими резкими границами, согласные с контактами интрузии и с расслоенностью вмещающих их габброидов. Рудные тела имеют крутое падение на юго-восток под углом $75\text{--}80^\circ$. В пределах Кусинского месторождения рудные пласты простираются на расстояние до 3 км при мощности от 1–3 до 9 м. Наибольшую мощность (9 м) они имеют в центральной части массива. В приконтактных зонах интрузии мощность рудных тел значительно меньше и составляет около 1 м. По данным [Фоминых, Андреев, 1970], для тел сплошных руд Кусинского месторождения характерно необычное выклинивание в виде так называемого “конского хвоста”, которое выражается расщеплением единого крупного рудного тела на более тонкие, переходящие в тонкоструйчатые руды. Мощность таких струек до 0.1–0.2 см, они постепенно выклиниваются, чередуясь с тонкими слоями меланократового амфиболита. Обращает на себя внимание постоянное присутствие в рудах интерстиционного хлорита, содержание которого варьирует от 14 до 35%.

Кроме главных рудных минералов ильменита (*Ilm*) и магнетита (*Mt*) в рудах присутствуют гематит, рутил, пирит, халькопирит, лейкоксен, а из нерудных минералов – роговая обманка, хлорит плагиоклаз, а также апатит, гранат, эпидот, биотит, кальцит.

Вкрапленные руды особенно широко распространены в восточной приконтактной зоне Кусинского массива. Они сложены бесполовошпатовыми амфиболитами с переменным количеством рудных минералов: титаномагнетита, ильменомангнетита, ильменита. Среди вкрапленных руд присутствуют линзы густовкрапленных руд, внутри которых залегают небольшие по протяженности и мощности пласты массивных руд [Формации..., 1984].

Рудные тела, как правило, залегают в меланократовых породах – бесполовошпатовых амфиболитах с хлоритом и гранатом. Непосредственно на контактах с рудой всегда присутствует хлоритовая зона переменной мощности, достигающая местами 80 см. Выше по разрезу эта зона переходит в амфиболиты с высоким содержанием граната. Далее

породы сменяются ритмично расслоенными мезократовыми и лейкократовыми амфиболитами. Обращает на себя внимание постоянное присутствие в породах апатита.

Гранат в околорудном ореоле всегда представлен гроссуляр-альмандиновым типом [Прибавкин и др., 2003]. Содержание кальция в гранате коррелируется с содержанием глинозема в сосуществующем амфиболе и в породе. Температура кристаллизации граната соответствует $700\text{--}800^\circ\text{C}$ при давлении 6–9 кбар. Глиноземистость роговой обманки возрастает по направлению к рудному телу. Вблизи рудных тел отмечаются высокоглиноземистые минералы: ставролит, кианит, корунд, а в самих рудах – богатые глиноземом хёгбомит и хлорит. Состав хлорита соответствует Al и Al-Fe –клинохлору, что также свидетельствует о повышенных давлениях и температурах кристаллизации этого минерала и самих руд.

Установлено [Ферштатер и др., 2001, 2005; и др.], что зональность околорудных ореолов повторяет зональность реакционных кайм в неизменном двупироксеновом габбро (скв. 2), где каждое зерно титаномагнетита и ильменита окружено близкими по составу хлорит-гранат-амфиболовыми каймами. Сходство в строении и составе этих кайм и околорудных зон пластовых руд свидетельствует об однотипном механизме и близких условиях их образования. В работах [Ферштатер и др., 2001, 2005; и др.] показано, что каймы в двупироксеновом габбро образуются в результате субсолидусного взаимодействия ранних порообразующих и рудных минералов с остаточным расплавом и флюидом, что свидетельствует о неравновесности рудной флюидно-магматической системы.

СООТНОШЕНИЕ ГАЛОГЕНОВ (Cl, F) В СОСУЩЕСТВУЮЩИХ АПАТИТЕ, АМФИБОЛЕ И СТАВРОЛИТЕ ИЗ ОКОЛОРУДНЫХ ПОРОД В РАЗРЕЗЕ ИНТРУЗИИ

Ниже приведены новые данные, характеризующие роль галогенов (хлора, фтора) в процессах формирования рудных залежей и вмещающих их амфиболитов в зависимости от позиции в вертикальном разрезе Кусинской интрузии. С этой целью, как было сказано выше, проведено изучение распределения Cl и F в сосуществующих апатите, амфиболе и ставролите из околорудных пород. Первые данные были ранее опубликованы в работе [Бочарникова и др., 2006]. Содержания Cl и F в указанных гидроксилсодержащих минералах отражают состав галоген-составляющей флюидной фазы в рудообразующем флюиде на момент формирования рудных тел.

Анализ этих данных показал, что по содержанию Cl и F во флюидсодержащих минералах из

рудных зон разных горизонтов интрузии имеются существенные различия. Наиболее обогащены хлором апатиты (до 4.1%) из околорудных пород, вмещающих пласты рудных тел в центральной части

интрузии (табл. 1, рис. 2). Здесь апатит образует достаточно крупные скопления линзовидной формы, что отражает более высокую степень насыщения флюидом и фосфором этой части интрузии.

Таблица 1. Содержание галогенов в апатитах из околорудных амфиболовых пород пластовых рудных тел в вертикальном разрезе Кусинской интрузии (месторождения), мас. %

Table 1. Composition of halogens in apatites from the layer ore body near ore rocks in vertical section of the Kusa intrusion (deposit), wt %

№	Размер, форма, позиция зерен апатита	Cl	F	Cl/F
Рудная зона у кровли интрузии, восточный контакт				
1	Таблитчатое 200 × 130 мк, в амфиболе, n = 8	1.02	1.01	1.00
2	Гексагональное 60 × 60 мк, n = 5	0.90	0.92	0.98
3	Неправильной формы 130 × 100 мк, n = 7	1.02	0.94	1.08
4	Таблитчатое 90 × 70 мк, в амфиболе, n = 5	0.84	0.87	0.96
5	Таблитчатое 80 × 60 мк, в амфиболе, n = 5	0.96	1.08	0.89
6	Таблитчатое 100 × 70 мк, n = 8	1.11	1.20	0.93
7	Таблитчатое 200 × 120 мк, n = 13	1.06	1.05	1.00
8	Гексагональное 250 × 120 мк, n = 11	1.33	0.67	1.98
9	Таблитчатое 45 × 30 мк, в сростании с рудным, n = 6	1.19	0.53	2.24
10	Таблитчатое 200 × 130 мк, n = 6	1.77	0.79	2.24
11	Таблитчатое 70 × 60 мк, в сростании с рудным, n = 5	1.48	0.64	2.31
12	Таблитчатое 200 × 100 мк, n = 6	1.46	0.63	2.32
13	Таблитчатое 60 × 30 мк, n = 10	1.84	0.66	2.78
14	Таблитчатое 50 × 40 мк, n = 4	1.93	0.76	2.54
15	Таблитчатое 130 × 100 мк, n = 6	1.41	0.71	1.98
16	Таблитчатое 45 × 30 мк, n = 4	1.51	0.72	2.10
Центральная рудная зона				
17	Таблитчатое 50 × 30 мк, n = 7	3.17	0.61	5.19
18	Таблитчатое 60 × 30 мк, n = 7	2.58	0.64	4.03
19	Таблитчатое 130 × 100 мк, n = 12	2.78	0.63	4.41
20	Таблитчатое 120 × 80 мк, n = 6	2.51	0.81	3.10
21	Неправильной формы, 700 × 450 мк, n = 20	2.95	1.04	2.83
22	Неправильной формы, 500 × 300 мк, n = 15	3.32	0.83	4.00
23	Неправильной формы 200 × 80 мк, n = 11	3.06	0.86	3.56
24	Таблитчатое 250 × 100, n = 10	2.74	0.35	7.83
25	Таблитчатое 230 × 120 мк, n = 7	3.21	0.47	6.83
26	Агрегат зерен 120 × 90 мк, n = 10	3.07	0.35	8.77
27	Таблитчатое буровой окраски, 70 × 40 мк, n = 6	4.10	0.37	11.08
28	Агрегат зерен 200 × 130 мк, n = 5	2.02	0.58	3.48
29	То же, n = 3	2.31	0.56	4.12
30	То же, n = 3	2.10	0.70	3.00
Рудная зона у подошвы интрузии, западный контакт				
31	Таблитчатое 230 × 120 мк, между зернами плагиоклаза, n = 17	1.90	0.65	2.92
32	Таблитчатое 100 × 80 мк, в плагиоклазе, n = 3	1.65	0.56	2.94
33	Неправильной формы 500 × 300 мк, n = 16	2.00	0.59	3.38
34	Таблитчатое, 50 × 40 мк, в сростании с амфиболом, n = 6	1.57	0.46	3.41

Примечание. 1–7 – надрудная меланократовая амфиболовая порода с реликтами ромбического пироксена, небольшим количеством граната, эпидота, апатита и рудного вещества (обр. кс-29, висячий бок рудного тела); 8–16 – подрудная меланократовая амфиболовая порода с реликтами ромбического пироксена гранатом и рудным веществом (обр. кс-31, кс-32, лежащий бок рудного тела); 17–23 – амфиболовая порода с рудным веществом (обр. х-99-5а); 24–26 – амфиболовая порода с реликтовой структурой двупироксенового габбро (обр. кс-103); 27–30 – амфиболовая порода с округлыми выделениями плагиоклаза, который содержит включения граната и кварца (обр. кс-101); 31–34 – амфиболовая порода с реликтами ромбического пироксена и рудным веществом (обр. кс-572); n – количество измерений в зерне.

Note. 1–7 – supra-ore melanocratic amphibole rock with rhombic pyroxene relicts, small quantity of garnet, epidote, apatite and ore substance (sample кс-29 ore body hanging wall); 8–16 – sub-ore melanocratic amphibole rock with relicts of rhombic pyroxene, garnet and ore substance (кс-31, кс-32, ore body lying wall); 17–23 – amphibole rock with ore substance (х-99-5а); 24–26 – amphibole rock with relict structure of biproxene gabbro (кс-103); 27–30 – amphibole rock with rounded plagioclase grains, containing inclusions of garnet and quartz (кс-101); 31–34 – amphibole rock with relicts of rhombic pyroxene and ore substance (кс-572); n – number of measurements in grain.

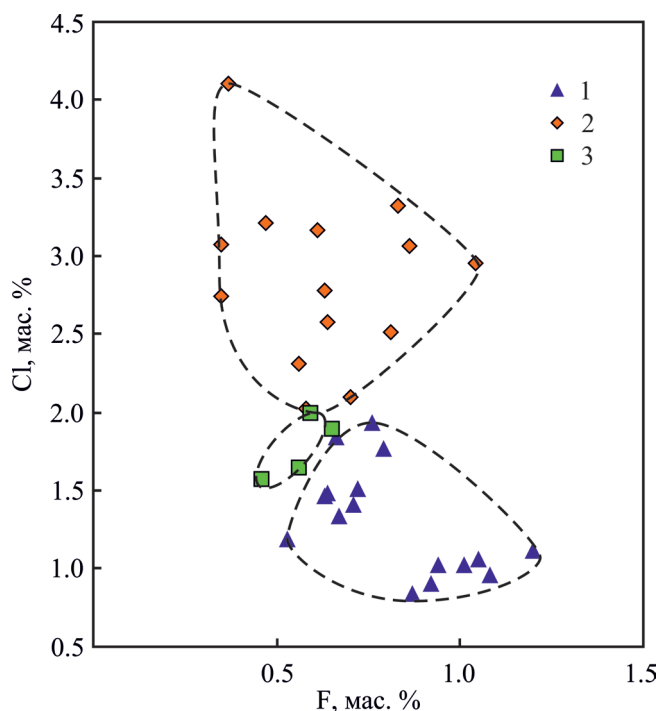


Рис. 2. Содержание Cl и F в апатитах из вмещающих рудный пласт меланократовых амфиболитов в зависимости от их позиции в разрезе Кусинского месторождения (интрузии).

1 – апатит из рудной зоны у кровли интрузии, восточный контакт; 2 – апатит из центральной рудной зоны; 3 – апатит из рудной зоны у подошвы интрузии, западный контакт.

Fig. 2. Cl and F composition in apatites from melanocratic amphibolites, enclosing ore bed in dependence of their position in the Kusa deposit profile (intrusion).

1 – apatite from ore zone near the intrusion roof, eastern contact; 2 – apatite from the central ore zone; 3 – apatite from the ore zone near the intrusion foot, western contact.

В апатитах из рудных зон приконтактных частей интрузии содержания хлора не превышают в целом 2%. В апатитах из рудной зоны у западного контакта интрузии (ее основание) хлора содержится немного больше, чем в апатитах из рудной зоны у восточного (кровля интрузии), где содержание F в апатитах достигает 1.20%. В апатите западной рудной зоны концентрации F не поднимаются выше 0.65%. Следует обратить внимание на то, что в околорудных породах рудного тела из восточной зоны (см. табл. 1, рис. 2) по соотношению Cl и F в апатите выделяются две группы. Одна характеризует околорудные породы со стороны лежащего бока рудного пласта (обр. кс-31, кс-32), другая – со стороны висячего (обр. кс-29). В апатитах первой группы выше содержание Cl, но ниже F, а в апатитах второй группы – наоборот. При этом в каж-

дой из них изменение содержаний Cl и F происходит синхронно.

В табл. 2 приведен химический состав околорудных пород с реликтовым железистым энстатитом – гиперстеном (восточная рудная зона). Состав породы близок к ультраосновному, и присутствие в ней реликтов гиперстена дают основание полагать, что ранее эта порода, возможно, была представлена пироксенином или оливиновым норитом. Мы видим, что повышенные концентрации F в околорудном апатите висячего бока (обр. кс-29) рудного тела коррелируется с повышенными содержаниями в породе Al_2O_3 , CaO, Na_2O , K_2O и особенно фосфора (1.27%). При этом повышенные концентрации Cl в околорудном апатите лежащего бока (обр. кс-31, кс-32) коррелируются с более высокими содержаниями в породе TiO_2 , FeO и MgO.

В целом различие в концентрациях F и Cl в апатите по разрезу интрузии отражает общий тренд дифференциации (расслоения) галоген-составляющей рудообразующего флюида по вертикали. В любой флюидно-магматической системе F всегда стремится к концентрации в ее верхней части [Холоднов, Бушляков, 2002; и др.], что объясняется геохимической особенностью фтора, более легкого по удельному весу, чем хлор.

На Кусинском месторождении химическая зональность проявляется и в разрезах самих пластообразных рудных залежей [Холоднов и др., 2002]. В центральной их части содержание окисного железа максимально (52.12% Fe_2O_3 при 22.62% FeO), тогда как в краевых зонах содержание Fe_2O_3 снижено до 42–44% при том же количестве FeO – 22–23%. Кроме того, в центре рудного пласта в максимальной степени концентрируются Cr (11 300 г/т) и V (5000 г/т). В краевых зонах рудных тел концентрации хрома (7000–8800 г/т), как и окисного железа, понижаются, а содержания MgO, SiO_2 и Al_2O_3 возрастают. В лежащем боку рудных тел существенно снижены и содержания V (до 760 г/т), в висячем боку содержание V – 4800 г/т – аналогично такому в центральной зоне.

Распределение галогенов в амфиболе и ставролите в околорудных хлорит-гранат-амфиболовых породах в зависимости от их позиции в разрезе интрузии подчиняется закономерности, аналогичной таковой для апатита [Бочарникова и др., 2006]. В околорудных породах установлены две генерации амфибола. Первая и основная генерация представлена темно-зеленой роговой обманкой, содержащей тонкую сыпь и скопления мелкозернистых рудных минералов. Вторая разновидность – это бедный глиноземом и железом зеленовато-желтый актинолит. Химический состав амфиболов в разрезе интрузии приведен в табл. 3. Видно, что роговая обманка из центральной рудной зоны имеет более высокие содержания K_2O (0.31–0.42), Na_2O (2.01–2.74) и Al_2O_3 (14.89–16.37), в то время как в восточ-

Таблица 2. Химический состав околорудных амфиболовых пород и реликтового железистого энстатита из рудной зоны у кровли интрузии, восточный контакт, мас. %**Table 2.** Chemical composition of near-ore rocks and relict ferruginous enstatite from ore zone near the intrusion roof, east contact, wt %

№ п.п.	n	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	П.п.п.	Сумма
1	1	40.69	2.09	8.97	21.29	0.15	10.83	11.58	1.90	0.14	1.27	2.90	102.09
2	3	38.95	3.43	6.43	31.71	0.23	11.57	4.35	1.12	0.08	0.13	2.80	101.70
3	1	55.76	0.04	0.94	20.31	0.40	20.87	0.62	0.10	0.00	–	–	99.05
4	2	54.74	0.05	2.31	20.00	0.36	21.25	0.58	0.09	0.00	–	–	99.41

Примечание. 1, 2 – амфиболовая порода: 1 – со стороны висячего бока рудного тела (обр. кс-29); 2 – со стороны лежащего бока (обр. кс-31, кс-32, кс-34); 3, 4 – железистый энстатит (гиперстен): 3 – висячий бок (обр. кс-29), 4 – лежащий бок (обр. кс-31); FeO* – общее; n – количество анализов.

Note. 1, 2 – amphibole rock: from the side of hanging wall of the ore body (кс-29); 2 – from the side of lying wall (кс-1, кс-2, кс-34); 3, 4 – ferruginous enstatite (hypershtene): 3 – hanging wall (кс-29), 4 – lying wall (кс-31); FeO* – general; n – number of analyses.

Таблица 3. Состав амфиболов из околорудных пород в вертикальном разрезе интрузии, мас. %**Table 3.** Amphibole composition of near-ore rocks in the vertical section of intrusion, wt %

№ п.п.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₃	Сумма
Рудная зона у кровли интрузии, восточный контакт												
1	42.80	0.62	14.25	16.18	0.21	10.38	10.33	1.97	0.29	0.22	0.09	97.34
2	43.11	0.55	14.59	16.05	0.23	10.26	10.20	1.86	0.28	0.22	0.09	97.44
3	43.60	0.56	14.46	16.55	0.19	9.72	10.74	1.63	0.31	0.23	0.07	98.06
4	42.86	0.55	14.65	16.05	0.19	9.63	10.88	2.06	0.28	0.23	0.07	97.42
5	46.69	0.59	13.07	11.20	0.24	14.26	11.27	1.75	0.13	0.28	–	99.48
6	46.89	0.59	12.15	11.22	0.20	14.27	12.16	1.73	0.12	0.00	–	99.35
7	46.77	0.55	11.45	11.20	0.24	14.84	11.88	1.79	0.11	0.30	–	99.14
Центральная рудная зона												
8	41.87	0.53	16.37	15.28	0.18	10.47	10.62	2.74	0.31	0.06	0.05	98.48
9	41.77	0.51	16.15	15.04	0.18	10.53	10.63	2.08	0.40	0.06	0.05	97.40
10	41.38	0.53	14.89	16.44	0.13	9.59	10.33	2.01	0.33	0.15	0.09	97.83
11	41.73	0.58	15.14	16.55	0.13	10.49	10.46	2.06	0.42	0.15	0.09	97.80
Рудная зона у подошвы интрузии, западный контакт												
12	43.05	0.40	14.12	13.33	0.16	13.62	10.94	2.02	0.28	0.00	0.00	97.92
13	43.24	0.42	11.44	15.80	0.19	14.14	11.03	1.97	0.26	0.00	0.00	98.49
14	54.04	0.09	2.94	8.74	0.10	16.23	11.06	1.93	0.27	–	–	95.40
15	52.54	0.07	2.90	8.34	0.10	17.06	11.06	1.92	0.29	0.00	0.00	96.26
16	53.48	0.07	3.07	8.34	0.08	16.17	11.20	1.81	0.26	0.00	0.00	96.47
17	53.01	0.70	2.98	8.35	0.90	16.61	11.13	1.86	0.27	0.00	0.00	95.81

Примечание. 1, 2 – меланократовый амфиболит с гранатом (обр. кс-457); 3, 4 – то же (обр. кс-458); 5–7 – меланократовый амфиболит с реликтовым железистым энстатитом, очень малым присутствием оливина (обр. кс-11в); 8, 9 – амфиболовая порода с плагиоклазом и реликтовой, теневой структурой дупироксенового габбро (обр. кс-101-б); 10, 11 – то же (обр. кс-102-б); 12–17 – рудный меланократовый амфиболит с гранатом и реликтовым железистым энстатитом (обр. кс-572); 12, 13 – роговая обманка, 14–17 – актинолит. Прочерк – нет анализа.

Note. 1, 2 – melanocratic amphibolite with garnet (кс-457); 3, 4 – the same (кс-458); 5–7 – melanocratic amphibolite with relict ferruginous enstatite, very small quantity of olivine (кс-11b); 8, 9 – amphibole rock with plagioclase and relict shadow structure of bipyroxene gabbro (кс-101-б); 10, 11 – the same (кс-102-б); 12–17 – ore melanocratic amphibolite with garnet and relict ferruginous enstatite (кс-572); 12, 13 – hornblende, 14–17 – actinolite. Dash – analysis is absent.

ной рудной зоне она содержит больше Cr₂O₃ (0.22–0.30). Обе генерации амфибола обнаруживают зависимость концентраций Cl в своем составе от позиции в разрезе интрузии (табл. 4). Так, роговая обманка из центральной зоны имеет максимальные содержания хлора – 0.30–0.38%, из пород рудной зоны у восточного контакта – сотые доли, до 0.07%,

а из пород у подошвы массива – 0.14–0.23%. Концентрация Cl в этих генерациях амфибола различается на порядок. Следует отметить, что амфибол, как и апатит, в околорудных зонах у основания интрузии содержит хлора заметно больше, чем амфиболы в околорудных зонах у ее кровли (см. табл. 1, 3). Химический состав амфиболов (см. табл. 3)

Таблица 4. Содержание Cl, F в амфиболе и ставролите околорудных амфиболовых пород из рудных зон в разрезе интрузии, мас. %

Table 4. Composition of Cl, F in amphibole and staurolite from near-ore amphibole rocks of ore zones in intrusion section, wt %

№ п.п.	Позиция минерала в разрезе интрузии	Cl	F
Рудная зона у кровли интрузии, восточный контакт			
1	Амфибол темно-зеленый, с рассеянной рудной пылью, n = 7	0.07	0.05
2	То же, n = 5	0.05	0.04
3	Амфибол темно-зеленый, с мелкими рудными скоплениями, n = 5	0.06	0.04
4	То же, без рудных включений, n = 6	0.05	0.04
5	То же, n = 6	0.05	0.00
6	То же, n = 4	0.06	0.03
7	То же, n = 5	0.05	0.00
8	Амфибол зеленовато-желтый, актинолит, n = 5	0.005	0.00
9	Ставролит, n = 3	0.14	0.05
Центральная рудная зона			
10	Амфибол темно-зеленый, с рудной сыпью, n = 5	0.31	0.04
11	Амфибол темно-зеленый, n = 7	0.30	0.03
12	Амфибол темно-зеленый, n = 5	0.37	0.05
13	Амфибол темно-зеленый, n = 4	0.38	0.04
14	Амфибол темно-зеленый, n = 5	0.31	0.00
15	Амфибол зеленовато-желтый, актинолит, n = 5	0.05	0.01
16	То же, n = 4	0.05	0.01
17	То же, n = 4	0.03	0.00
18	То же, n = 5	0.05	0.00
19	Ставролит, n = 6	0.35	0.02
20	То же, n = 5	0.35	0.01
21	То же, n = 4	0.38	0.03
Рудная зона у подошвы интрузии, западный контакт			
22	Амфибол темно-зеленый, n = 6	0.14	0.00
23	Амфибол зеленовато-желтый, актинолит, n = 3	0.02	0.01
24	Амфибол темно-зеленый, n = 9	0.23	0.03

Примечание. 1–9 – амфиболовая порода с гранатом, эпидотом, рудным веществом, апатитом (обр. кс-29, кс-29а, кс-31); 10–21 – амфиболовая порода с плагиоклазом и реликтовой, теневой структурой двупироксенового габбро (обр. кс-101, кс-103); 22–24 – амфиболовая порода (обр. кс-572, кс-596); n – количество анализов.

Note. 1–9 – amphibole rock with garnet, epidote, ore substance, apatite (кс-29, кс-29а, кс-31); 10–21 – amphibole rock with plagioclase and relict, shadow structure of bipyroxene gabbro (кс-101, кс-103); 22–24 – amphibole rock (кс-572, кс-596); n – number of analyses.

свидетельствует о том, что амфиболы околорудных зон у основания Кусинского массива, по сравнению с таковыми вышележащих зон, отличаются отсутствием в их составе хрома и ванадия. Таким образом, богатый глиноземом и железом темно-зеленый амфибол, как и апатит, из околорудных пород центральной части Кусинского месторождения, имеет максимальные содержания хлора в сравнении с амфиболом из рудных зон у контактов интрузии.

Близкие по составу разновидности амфибола установлены в двупироксеновом габбро Кусинского и Медведевского массивов [Ферштатер и др., 2001; Холоднов и др., 2016]. В последнем богатые алюминием (Al_2O_3 – 14–21%) и железом (FeO – 14–20%) сине-зеленые зональные амфиболы в двупироксеновом габбро относятся к позднемагматическому субсолидусному типу. Они характеризуются высоким содержанием хлора (до 0.58 мас. %).

Развиваются в виде кайм вдоль границ орто- и клинопироксена и рудных минералов с плагиоклазом. Часто амфиболы этого типа формируются по всему межзерновому пространству, проникая по трещинкам внутрь других темноцветных минералов: в частично уралитизированный клинопироксен, в более раннюю бурую роговую обманку. Такие амфиболы по своему составу в каймах меняются от железистой роговой обманки до ферроэденита и ферропаргасита. По данным геобарометров, кристаллизация амфибола этого типа происходила при давлении около 6 кбар, что соответствует уровню становления Медведевского массива, температура при этом снижалась от 980 до 600°C. Амфиболы в двупироксеновом габбро по составу существенно отличаются [Холоднов и др., 2016, рис. 2] от амфиболов более ранней сосюритизированной ритмично-расслоенной габбро-анортозитовой серии Медведевского массива. Последние характеризуются бо-

лее высокой железистостью (0.75 против 0.55 в дупироксеновом габбро) и менее высокой глиноземистостью. Содержание Al_2O_3 здесь не превышает 13 мас. %.

Ставролит в околорудных породах Кусинского месторождения наблюдается в виде мелких кристаллов, включенных в таблитчатые индивиды плагиоклаза. Ранее он был уже охарактеризован [Мясников и др., 1970; Бочарникова и др., 2006]. Наибольшее количество ставролита отмечается в околорудных породах центральной части месторождения. Здесь он имеет наиболее высокое содержание хлора – 0.35–0.38 против 0.14% в ставролите из восточной рудной зоны (см. табл. 4).

Химический состав и содержание редких элементов в рудах в разрезе Кусинской интрузии приведены в табл. 5. Обращает на себя внимание то, что на всех уровнях руды характеризуются более высокими концентрациями Fe_2O_3 по отношению к FeO .

Это обусловлено тем, что хлор – это сильный окислитель, концентрации которого в центральной части интрузии максимальны. Здесь руды отличаются более высокими содержаниями MgO , Cr , Co , Hf . При этом в них меньше SiO_2 , TiO_2 , Ta , Pb . Вниз по разрезу содержание Zn в рудах убывает. Содержание РЗЭ в рудных телах нарастает от подошвы массива к его кровле. Спектры РЗЭ показаны на рис. 3. Одновременно вверх по разрезу возрастает степень фракционирования РЗЭ с преобладанием крупных легких лантаноидов ($La/Yb = 8.2$) и при значительной отрицательной аномалии Eu у руд центральной части интрузии. Здесь в повышенном количестве присутствуют Hf и Th . Отношение Th/U имеет здесь максимальное значение – 17.0.

Рост в апатитах содержания фтора на фоне более низких концентраций хлора в рудах у кровли (см. рис. 2) снижает потенциал кислорода, вследствие чего содержание Fe_2O_3 существенно понижается, а доля FeO пропорционально (на 8%) повышается. Более восстановительный режим у кровли массива способствует увеличению в массивных рудах этого уровня содержания TiO_2 , а также Ni и РЗЭ при росте в составе последних содержания Eu . Спектр РЗЭ в рудах у кровли массива наиболее фракционирован ($La/Yb = 12.3$), в отличие от более окисленных руд в центре интрузии, где наблюдается отрицательный Eu -минимум. Кроме того, в рудах центральной зоны снижено содержание MgO , а также количество Cr , Co , Zn , Hf и Th , но повышено содержание Na_2O , Ta , Tl , Pb , Bi , U . Отношение Th/U имеет здесь минимальное значение – 1.5.

В рудных телах у подошвы массива, где содержание хлора в апатите, амфиболе и ставролите в околорудных породах несколько выше, чем у кровли массива (при минимуме фтора), доля FeO относительно Fe_2O_3 также понижена, но количество TiO_2 , Al_2O_3 , SiO_2 и CaO является наиболее высоким.

Таблица 5. Содержание петрогенных (мас. %) и редких (г/т) элементов в рудах из разных горизонтов в вертикальном разрезе интрузии

Table 5. Composition of petrogenic (wt %) and rare (ppm) elements in ores from different horizons in the intrusion vertical section

Компонент	кс-30	кс-98	кс-249
SiO_2	5.10	4.96	6.00
TiO_2	16.33	13.84	17.37
Al_2O_3	5.51	6.47	6.64
Fe_2O_3	34.48	41.72	33.37
FeO^*	30.20	22.98	28.50
MnO	0.17	0.17	0.14
MgO	5.64	6.05	5.64
CaO	0.07	0.11	0.14
Na_2O	0.60	0.00	0.04
K_2O	0.04	0.00	0.01
P_2O_5	0.03	0.03	0.01
Сумма	102.71	96.33	101.81
Cr	9878.000	12009.860	4615.900
Ni	602.700	573.750	385.790
Co	134.800	171.790	115.700
Zn	416.000	1873.930	1964.980
La	0.642	0.288	0.119
Ce	1.277	0.629	0.284
Pr	0.155	0.080	0.034
Nd	0.630	0.320	0.139
Sm	0.137	0.073	0.035
Eu	0.044	0.009	0.011
Gd	0.135	0.088	0.036
Tb	0.021	0.014	0.006
Dy	0.126	0.079	0.035
Ho	0.024	0.015	0.007
Er	0.064	0.040	0.020
Tm	0.009	0.006	0.003
Yb	0.052	0.035	0.018
Lu	0.008	0.005	0.003
Hf	0.121	0.650	0.241
Ta	0.363	0.217	0.255
Re	0.002	0.000	0.002
Tl	0.067	0.015	0.040
Pb	1.423	1.199	0.691
Bi	0.025	0.014	0.014
Th	0.127	0.375	0.333
U	0.083	0.022	0.062

Примечание. Обр. кс-30 – руда из пласта у кровли интрузии; кс-98 – руда из пласта в центральной рудной зоне; кс-249 – руда из пласта у подошвы интрузии. $FeO^* = [FeO + (Fe_2O_3)0.9]$ – общее железо.

Note. Sample кс-30 – ore from the layer near the intrusion cover; кс-98 – ore from the layer in central ore zone; кс-249 – ore from the layer near the intrusion foot. $FeO^* = [FeO + (Fe_2O_3)0.9]$ – total Fe.

Содержание Cr , Ni , Co минимально, а Zn – максимально. Количество РЗЭ в рудах здесь также минимально, при самой низкой степени их фракционирования ($La/Yb = 6.6$), Eu аномалия отсутствует. Содержание Pb и Bi также является низким. Отношение Th/U имеет промежуточное значение – 5.5.

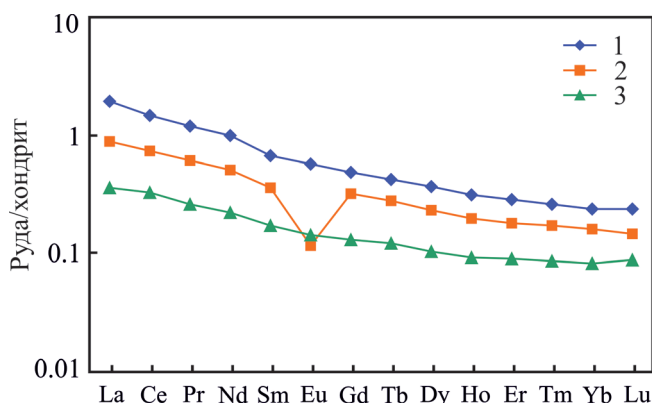


Рис. 3. Нормированное по хондриту [Sun, 1982] распределение РЗЭ в пластовых ильменит-магнетитовых рудах Кусинского месторождения.

1 – кровля интрузии, восточная рудная зона (обр. кс-30); 2 – центральная рудная зона (обр. кс-98); 3 – подошва интрузии, западная рудная зона (обр. кс-249).

Fig. 3. Normalized on chondrite [Sun, 1982] distribution of REE in layered ilmenite-magnetite ores of the Kusa deposit.

1 – intrusion roof, the eastern ore zone (sample кс-30); 2 – central ore zone (кс-98); 3 – intrusion foot (western ore zone, кс-249).

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЛОГЕНОВ В АПАТИТЕ ДВУПИРОКСЕНОVOГО ГАББРО – ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ЕДИНСТВА ПРОЦЕССОВ ПЕТРО- И РУДОГЕНЕЗА

Двупироксеновое габбро

Рассмотрим распределение галогенов Cl и F в апатите и амфиболе из двух типов двупироксенового габбро. Оба находятся в разрезе расслоенных габброидов в центральной части Кусинской интрузии. Первый тип – это свежее двупироксеновое габбро (мощность 0.5 м), расположенное на значительном удалении от рудного тела, второй – метасоматическое измененное габбро вблизи рудного пласта. Последнее сохранило теньевую структуру свежего двупироксенового габбро. Оно сложено вторичными минералами в переменных количествах (плаггиоклаз, скаполит, амфибол, ставролит). Измененное габбро обогащено апатитом, который образует крупные выделения неправильной формы и линзовидные скопления. Содержание оксида фосфора в измененном габбро – 0.3% против 0.05% P_2O_5 в свежем габбро. Апатиты из свежего габбро по содержанию галогенов делятся на три группы [Бочарникова, 2009]. В апатите (группа I) повышенное содержание хлора – 1.4–1.9%, отношение Cl/F = 4.6–10.7. Апатит (группа II) характеризуется умеренным содержанием хлора (1.3–1.5%) и повышен-

ным – фтора (0.7–1.1%), отношение Cl/F = 1.3–1.7. Апатит (группа III) с высоким содержанием фтора (1.7–1.8%) имеет отношение Cl/F = 0.5 (табл. 6). Для апатита (группа III) характерна связь с рудными минералами. Следует отметить, что апатиты всех трех групп присутствуют в виде включений в плаггиоклазе, что свидетельствует о том, что еще до его кристаллизации в расплаве уже существовало несколько галогенсодержащих флюидных фаз с разными концентрациями Cl и F.

Составы Cl и F в апатитах из метасоматически измененного габбро разделились на две ветви (см. табл. 6, рис. 4), одна из них тяготеет к полю I, а другая – к полю II. Это является доказательством единства процессов породо- и рудогенеза в кусинской интрузии.

Концентрации Cl, F в амфиболах из этих разновидностей габбро различаются на порядок. Амфибол из свежего габбро характеризуется очень низкими концентрациями хлора – 0.04% (табл. 7). Содержания Cl в амфиболе и ставролите из измененного габбро составляют уже десятые доли процента: в амфиболе – 0.25–0.38%, в ставролите – 0.19–0.38%. При этом концентрации фтора в обоих случаях очень малы и составляют сотые доли процента (0.03–0.05%). По содержанию хлора и фтора апатиты в двупироксеновом габбро и апатиты в околорудных породах рудных пластов, находящихся в подошве и вблизи кровли Кусинского массива, близки (см. рис. 2, 4), они образуют практически единое поле. Лишь в центральной части массива апатиты околорудных пород имеют более значительные концентрации хлора.

Эти данные указывают на то, что формирование двупироксенового габбро и околорудных пород с пластами магнетит-ильменитовых руд происходило в единой, изначально флюидонасыщенной, высокохлористой рудно-магматической системе, в которой при участии богатого хлором флюида произошло метасоматическое преобразование двупироксенового габбро с выносом из него рудных компонентов и формирование рудообразующего (Fe, Ti, V, Cr и др.) флюида, флюидизированного рудного расплава. В результате образовался вторичный парагенезис минералов, обогащенных хлором (амфибол, ставролит, апатит и др.). Особенно интенсивно рудообразующий процесс проявился в центральной части Кусинского месторождения, где в околорудных породах отмечены максимально высокие концентрации хлора – до 4% – и сформированы наиболее крупные рудные тела.

Концентрации хлора в апатитах двупироксенового и амфиболового габбро **Кусинского массива** значительно превышают его содержание в апатитах более южных рудоносных Копанского и Медведевского массивов. Так, в апатите двупироксенового габбро **Копанского массива** концентрации хлора не превышают 0.15–0.55% при содержа-

Таблица 6. Содержание Cl и F в апатите из двупироксенового габбро центральной части интрузии, мас. %**Table 6.** Cl and F compositions in apatite from bipyroxene gabbro of the central part, of intrusion, wt %

№ п.п.	Размер, форма, позиция зерен апатита	Cl	F	Cl/F
Габбро свежее				
<i>Группа I – апатит с повышенным хлором</i>				
1	Таблитчатое 60 × 30 мк, в плагиоклазе, n = 4	1.50	0.14	10.71
2	Таблитчатое 200 × 130 мк, в сростании с пироксеном, n = 7	1.86	0.29	6.41
3	Таблитчатое 150 × 120 мк, в плагиоклазе, n = 7	1.89	0.32	5.90
4	Таблитчатое 200 × 80 мк, между амфиболом и плагиоклазом, n = 5	1.61	0.35	4.60
5	Таблитчатое 50 × 20 мк, в амфиболе, n = 3	1.78	0.38	4.70
6	Таблитчатое 200 × 50 мк, между зернами плагиоклаза, n = 5	1.43	0.23	6.22
<i>Группа II – промежуточная</i>				
7	Таблитчатое 70 × 40 мк, в плагиоклазе, n = 3	1.30	0.84	1.55
8	Изометричное 300 × 280 мк, в плагиоклазе на границе с амфиболом, n = 7	1.52	1.16	1.31
9	Таблитчатое 250 × 180 мк, на границе плагиоклаза и амфибола, n = 4	1.47	0.97	1.51
10	Таблитчатое 130 × 100 мк, на границе между зернами амфибола, n = 8	1.29	0.76	1.70
<i>Группа III – апатит с повышенным фтором</i>				
11	Таблитчатое 200 × 130 мк, между рудным и плагиоклазом, n = 8	1.00	1.80	0.55
12	Таблитчатое 70 × 40 мк, в плагиоклазе, n = 3	0.89	1.68	0.53
Габбро измененное				
13	Таблитчатое 40 × 30 мк, n = 5	1.34	0.59	2.27
14	Агрегат зерен 300 × 200 мк, n = 5	2.02	0.58	3.48
15	Агрегат линзовидной формы 700 × 120 мк, n = 9	1.74	0.65	2.68
16	То же, n = 5	2.01	0.66	3.04
17	То же, n = 3	1.56	0.56	2.78
18	Неправильной формы 700 × 450 мк, n = 6	1.40	1.25	1.12
19	Агрегат зерен 350 × 250 мк, n = 6	1.31	1.04	1.26
20	Таблитчатое 250 × 150 мк, в сростании со ставролитом, n = 7	1.34	1.12	1.20

Примечание. 1, 7 – шахта Центральная, горизонт 166 (обр. 6-A-69); 2–6, 8–12 – на удалении от рудного тела (обр. кс-79); 13–20 – вблизи рудного тела (обр. кс-101, кс-102); n – количество измерений в зерне.

Note. 1, 7 – mine Tsentralnaya; horizon 166 (6-A-69); 2–6, 8–12 – at a distance from the ore body (кс-79); 13–20 – near the ore field (кс-101, кс-102); n – a number of measurements in grain.

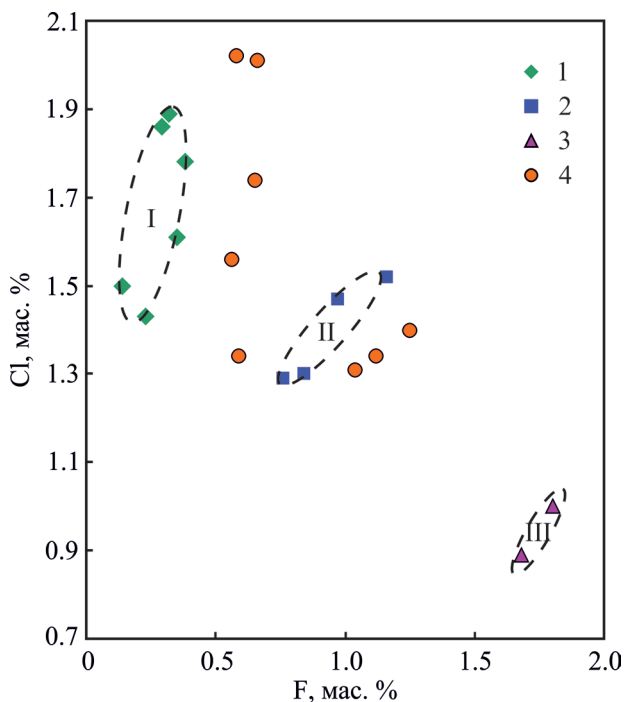


Рис. 4. Распределение Cl и F в апатитах из двупироксенового габбро (центральная часть Кусинского месторождения).

1–3 – свежее габбро: 1 – апатит с повышенным содержанием хлора ($Cl > F$, поле I); 2 – апатит с умеренным содержанием Cl и F (поле II); 3 – апатит с повышенным содержанием фтора ($Cl < F$, поле III); 4 – измененное двупироксеновое габбро.

Fig. 4. Distribution of Cl and F in apatites from bipyroxene gabbro (central part of the Kusinskoe deposit).

1–3 – fresh gabbro: 1 – apatite with the higher chlorine ($Cl > F$, Field I); 2 – apatite with moderate compositions of Cl and F (Field II); 3 – apatite with higher fluorine ($Cl < F$, Field III); 4 – modified bipyroxene gabbro.

нии фтора 1.5–2.4% [Бочарникова, 2009]. В апатите двупироксенового габбро **Медведевского массива** содержание хлора возрастает до 0.50–0.80% при концентрациях фтора 1.0–2.0% [Холоднов и др., 2016]. При этом в ритмично-расслоенном амфиболовом габбро этого массива содержание хло-

Таблица 7. Содержание Cl, F в амфиболе и ставролите в двупироксеновом габбро из центральной части массива, мас. %

Table 7. Cl, F compositions in amphibole and staurolite in bipyroxene gabbro from the central part of massif, wt %

№ п.п.	Амфибол, ставролит	Cl	F
Габбро свежее			
1	Амфибол темно-зеленый, n = 4	0.04	0.04
Габбро измененное			
2	Амфибол темно-зеленый, n = 5	0.37	0.05
3	То же, n = 4	0.38	0.04
4	Амфибол темно-зеленый с рудной сыпью, n = 5	0.31	0.04
5	Амфибол зеленый, n = 7	0.30	0.03
6	Амфибол темно-зеленый, n = 5	0.25	0.05
7	Ставролит, n = 4	0.38	0.03
8	То же, n = 6	0.19	0.05

Примечание. 1 – на удалении от рудной зоны (обр. кс-79); 2–8 – в рудной зоне (обр. кс-101, кс-102); n – количество измерений в зерне.

Note. 1 – at a distance from the ore zone (кс-79); 2–8 – in ore zone (кс-101, кс-102), n – number of measurements in grain.

ра в апатитах составляет всего 0.06–0.18% при концентрациях фтора 0.8–2.2%.

Из этого следует, что Кусинская интрузия изначально была более флюидизированной и хлоронасыщенной по сравнению с южными менее глубинными габбровыми массивами. Эти различия и предопределили наиболее благоприятные условия для формирования здесь наиболее мощных рудных залежей. В данных рудах соотношение ильменит/магнетит составляет 1/2, при этом магнетит здесь самый низкотитанистый. В южных месторождениях (Медведевском, Копанском и Маткальском) при дефиците в расплаве и флюиде Cl и H₂O и при более низкой фугитивности кислорода формировалось в основном вкрапленное, но крупное по запасам ильменит-титаномагнетитовое оруденение, в котором ильменит находится в парагенезисе с высокотитанистым титаномагнетитом (10–15% TiO₂). В этих месторождениях (особенно в Медведевском) рудные пласты имеют малую мощность и с ними не ассоциируют такие большие объемы околорудных преобразований, как на Кусинском месторождении.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЛОГЕНОВ В АПАТИТАХ РИТМИЧНО- РАССЛОЕННЫХ ГАББРОИДОВ С ВКРАПЛЕННЫМ И МАССИВНЫМ (СЕГРЕГИРОВАННЫМ) ОРУДЕНЕНИЕМ

В качестве объектов для данного исследования были выбраны два разреза из центральной части Кусинского месторождения, один из которых со-

держит рассеянную рудную вкрапленность, а другой – массивные руды. Первый разрез – это тонко расслоенные габброиды, представленные чередованием слоев мощностью 1–4 см, сложенных меланократовым амфиболовым габбро и лейкократовым габбро (обр. кс-3). Рудное вещество (Ilm, Mt) равномерно рассеяно по всему объему породы как в пределах меланократовой, так и лейкократовой ее частей. Равномерность распределения рудного вещества свидетельствует о том, что оно выделилось из расплава раньше, чем были сформированы разные по составу слойки. Рудное вещество здесь осталось на месте, не претерпев мобилизации и перераспределения [Бочарникова и др., 2003].

Второй разрез содержит прослой массивной магнетит-ильменитовой руды мощностью около 2.5 см (обр. х-99). По мере удаления от контакта руда сменяется меланократовой гранатосодержащей рудной амфиболовой породой, далее – лейкократовой амфибол-плагиоклазовой породой и плагиоклазитом. Химический состав пород и руд этого разреза опубликован [Холоднов и др., 2002]. В меланократовой части этого разреза рудное вещество распределено неравномерно, наблюдаются отдельные скопления неправильной формы и линзочки, вплоть до образования целых слоев. В плагиоклазите рудное вещество практически отсутствует. То есть произошел процесс перераспределения и сегрегирования рудного вещества с образованием более крупных скоплений массивных руд (рудные слои). В таких рудах содержание TiO₂ составляет 12.5–14.0, Fe₂O₃ – 27–43, FeO – 30–31% при повышенном количестве Cr (5900 г/т) и V (5900 г/т). Отношение TiO₂/FeO = 0.19–0.21, что позволяет отнести породы и руды этого разреза к высокотитанистому типу. В целом эти показатели близки к таковым крупных пластов массивных руд, охарактеризованных выше.

Анализ состава апатита из меланократовой и лейкократовой составляющих этих разрезов показал, что концентрации Cl и F в апатитах в них существенно различаются (рис. 5). В первом разрезе с рассеянной рудной вкрапленностью (поле “а”) содержание хлора в апатитах не превышает 1.8% (при диапазоне концентраций 1.0–1.8%) и содержания F – 1.0–1.5%. В породах с прослоем массивной магнетит-ильменитовой руды (поле “б”) содержание Cl достигает 3.3% (при вариации 1.5–3.3 %) и концентрации F 0.5–1.0%.

В обоих разрезах более высокое содержание Cl характерно для апатитов из меланократовых пород. При этом максимальный разброс содержания Cl в апатитах между мелано- и лейкократовыми породами отмечен в разрезе с массивной рудой.

Кроме того, апатит в разрезе с рассеянной вкрапленностью обычно включен как в плагиоклаз, так и в амфибол. Это означает, что еще до формирования слойков разного состава в расплаве одновре-

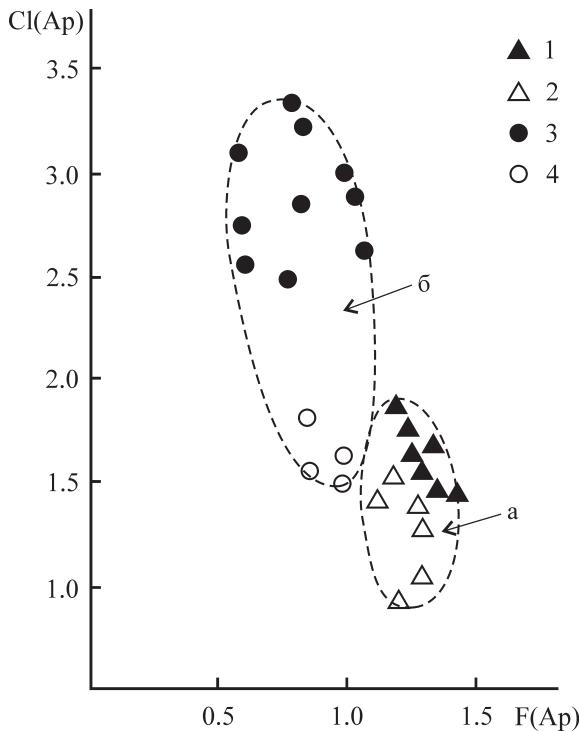


Рис. 5. Распределение Cl и F в апатитах из расслоенных пород.

а – поле состава апатита из пород с рассеянной рудной вкрапленностью; б – поле состава апатита из пород, сопровождающих массивные магнетит-ильменитовые руды. 1 – меланократовая амфиболовая порода, 2 – лейкократовая амфибол-плагноклазовая порода, 3 – меланократовая рудная гранатсодержащая амфиболовая порода, 4 – плагноклазит.

Fig. 5. Cl and F distribution in apatites from laminated rocks.

а – field of apatite composition from rocks with scattered ore dissemination; б – field of apatite content from the rocks accompanying massive magnetite-ilmenite ores. 1 – melanocratic amphibole rock, 2 – leucocratic amphibole-plagioclase rock, 3 – melanocratic ore garnet-containing amphibole rock, 4 – plagioclase.

менно существовало несколько флюидных фаз с разными концентрациями Cl и F, которые впоследствии были захвачены плагноклазом и амфиболом при их кристаллизации, что в дальнейшем предопределило формирование расслоенности.

Таким образом, характер распределения рудного вещества в разрезе с вкрапленным оруденением указывает на то, что изначально рудное вещество в расплаве находилось в равномерно рассеянном состоянии. Заметного фракционирования между хлором и фтором здесь не происходило, поэтому апатиты из расслоенных меланократовых и лейкократовых пород достаточно близки по содержанию хлора и фтора. В этом случае никакого перераспределения рудного вещества не было, и оно при фор-

мировании тонкой расслоенности так и осталось в равномерно рассеянном состоянии. Во втором случае рудное вещество, ранее находившееся в расплаве и породах в равномерно рассеянном состоянии, именно под воздействием флюида со значительно более высокой концентрацией хлора подверглось мобилизации, перераспределению и последующей концентрации (сегрегации) в скопления с формированием рудных слойков, а затем и более крупных рудных масс. Этот богатый хлором флюид определил и околорудные преобразования габброидов с их кислотным выщелачиванием и образованием нетипичных для габброидных пород, таких высокоглиноземистых минералов, как ставролит, корунд, кианит и др. [Прибавкин и др., 2003].

ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА ИЛЬМЕНИТА И МАГНЕТИТА, А ТАКЖЕ ХЁГБОМИТА И ШПИНЕЛИ В РУДНЫХ ТЕЛАХ В РАЗРЕЗЕ КУСИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Ильменит и магнетит. В кусинских рудах ильменит, являясь более ранним и высокотемпературным минералом, всегда идиоморфен по отношению к магнетиту. Ильменит в магнетите наблюдается в виде мелких округлых включений и образований типа эмульсионных капель, при этом часто зерна ильменита образуют отдельные скопления в виде линзочек, цепочек, шпиров и гнезд. Иногда зерна ильменита и магнетита, тесно соприкасаясь друг с другом, имеют полиэдрические очертания. В тех случаях, когда они разобщены, зерна ильменита имеют округлые очертания или неправильные формы. Размеры зерен ильменита и магнетита близки и составляют в среднем 0.2–0.3 мм при вариациях от 0.06 до 1.00 мм. В табл. 8 приведены составы сосуществующих ильменитов и магнетитов из рудных пластов в краевых зонах Кусинской интрузии (подошва, кровля) и в центральной ее части. В рудных телах у основания интрузии ильменит содержит значительно больше Cr_2O_3 , V_2O_5 , Al_2O_3 , ZnO и MnO по сравнению с ильменитом из рудных пластов у кровли, где он имеет повышенное содержание TiO_2 . В ильмените массивных руд из центральной части интрузии содержится больше MgO и FeO [Бочарникова и др., 2005]. Магнетит из рудных тел у кровли массива, как и ильменит, имеет более высокие концентрации TiO_2 , а также Al_2O_3 , у подошвы интрузии он, как и ильменит, несколько обогащен ZnO , а в центральной части имеет повышенное содержание MgO и особенно Cr_2O_3 .

Как было показано выше, на Кусинском месторождении, в центральной его части с наиболее высоким содержанием Cl в минералах (апатит, амфибол, ставролит), для рудных тел характерны наиболее высокие концентрации Fe_2O_3 при пони-

Таблица 8. Состав ильменита и магнетита из рудных тел вблизи западного (подошва) и восточного (кровля) контактов, и в центральной части Кусинской интрузии, мас. %

Table 8. Ilmenite and magnetite composition from ore bodies near western (foot) and eastern (roof) contacts and from central part of the Kusa intrusion, wt %

Оксиды	Ильменит			Магнетит		
	1	2	3	1	2	3
TiO ₂	50.35	50.42	51.43	0.08	0.11	0.20
FeO	47.02	47.34	46.80	96.82	95.90	96.47
MgO	0.90	1.04	0.68	0.07	0.09	0.05
Cr ₂ O ₃	0.65	0.29	0.17	1.39	2.34	1.74
Al ₂ O ₃	0.11	0.07	0.04	0.28	0.22	0.37
ZnO	0.15	0.14	0.08	0.21	0.12	0.17
V ₂ O ₅	0.22	0.11	0.08	1.07	1.07	1.10
MnO	0.82	0.64	0.60	0.05	0.00	0.04
Сумма	100.22	99.67	99.88	99.97	99.85	100.14
n	4	6	7	5	5	6

Примечание. 1 – рудные тела у подошвы массива (обр. кс-570, кс-249, кс-224); 2 – рудное тело в центральной части интрузии (обр. кс-95, кс-97); 3 – рудные тела у кровли (обр. кс-30, кс-33, кс-37); n – количество анализов.

Note. 1 – ore bodies near the foot (кс-570, кс-249, кс-224); 2 – in the central part (кс-95, кс-97); 3 – near the roof of intrusion (кс-30, кс-33, кс-37); n – a number of analyses.

женном содержании FeO (окислительный режим) (см. табл. 5) FeO/Fe₂O₃ = 0.55. При этом здесь наблюдается более высокое содержание MgO и особенно Cr₂O₃. Магнетит в массивных рудах этой центральной части месторождения также отличается резко повышенным содержанием Cr₂O₃, а ильменит содержит больше MgO и FeO. В рудных телах приконтактных зон интрузии содержание Fe₂O₃ относительно центра интрузии существенно ниже, а доля FeO пропорционально повышена, что обусловлено снижением потенциала кислорода. Руды этих зон имеют близкие значения FeO/Fe₂O₃: у кровли – 0.87, у подошвы – 0.85. Более восстановительный режим в приконтактных зонах способствовал увеличению в массивных рудах этих уровней содержания TiO₂ (см. табл. 5). Ранее [Штейнберг и др., 1959] на Кусинском и Копанском месторождениях была также отмечена обогащенность Cr₂O₃ центральной части рудных тел.

По химическому составу руды в поперечном разрезе конкретного рудного тела (кс-95–кс-98) также имеют различия. Например, в центральной его части содержание Fe₂O₃ максимально, как максимально и содержание Cr (11300 г/т) и V (5000 г/т). Это находит отражение и в составе рудных минералов. Так, магнетит из центра рудного тела имеет максимальное содержание Cr₂O₃ и V₂O₅ (табл. 9), при этом у основания наблюдаются наиболее высокие концентрации MgO, FeO и TiO₂, а у кровли пла-

Таблица 9. Состав ильменита и магнетита в поперечном разрезе одного рудного пласта из центральной рудной зоны, мас. %

Table 9. Ilmenite and magnetite compositions in cross-section of one ore layer from the central ore zone, wt %

Оксиды	Ильменит			Магнетит		
	1	2	3	1	2	3
TiO ₂	50.67	50.42	49.88	0.22	0.11	0.08
FeO	43.22	47.34	47.97	98.55	95.90	93.04
MgO	4.28	1.04	0.60	0.22	0.09	0.07
Cr ₂ O ₃	1.88	0.29	0.06	0.06	2.34	2.04
Al ₂ O ₃	0.18	0.07	0.01	0.04	0.22	0.25
ZnO	0.00	0.14	0.01	0.00	0.12	0.10
V ₂ O ₅	0.00	0.11	0.86	–	1.07	0.57
MnO	0.00	0.64	0.34	–	0.00	0.01
Сумма	100.23	99.67	99.73	99.10	99.85	96.16
n	1	6	3	1	5	4

Примечание. 1 – приподошвенная часть рудного пласта (обр. кс-98); 2 – центральная его часть, (обр. кс-95, кс-97); 3 – прикровлевая часть пласта (обр. кс-96). Прочерк – нет данных.

Note. 1 – near-foot part of ore layer (кс-98); 2 – its central part (кс-95, кс-97); 3 – near-roof part of the layer (кс-96). Dash – no data.

ста – повышенные содержания Cr₂O₃ и Al₂O₃. В ильмените у основания рудного пласта максимальны концентрации MgO и Cr₂O₃, Al₂O₃, содержание которых вверх по разрезу к кровле последовательно снижается, при этом у кровли наиболее высокие концентрации V₂O₅. В ильмените из центральной части рудного пласта отмечаются наибольшие концентрации ZnO и особенно MnO.

Таким образом, проявлена дифференциация рудных компонентов как на уровне формирования рудных тел в разрезе интрузии, так и в пределах отдельно взятого рудного пласта.

Хёгбомит и шпинель. Хёгбомит в месторождениях Кусинско-Копанской группы был отмечен в 1952 г. В.А. Молевой, В.С. Мясниковым, затем О.В. Карповой [1974]. По данным [Бочарникова и др., 2005], в разрезе Кусинской интрузии хёгбомит встречается во всех рудных телах, но распределение его весьма неравномерное. На одних участках в рудах содержание хёгбомита может составлять 5–7%, на других – отмечаются лишь единичные зерна либо он отсутствует. Размер зерен хёгбомита в среднем составляет 0.2–0.5 мм. Часто в нем наблюдаются простые и полисинтетические двойники. Иногда наблюдается тесная ассоциация хёгбомита и шпинели, в которой первый минерал формируется в краевых зонах зерен шпинели (рис. ба). В основном хёгбомит образует зерна неправильной формы и самостоятельные кристаллы таблитчатого облика, располагаясь между магнетитом и ильменитом, а также бывает приурочен к интерстиционным скоплениям богатого глиноземом хлорита (рис. бб, в). Часто встречаются и скелетные

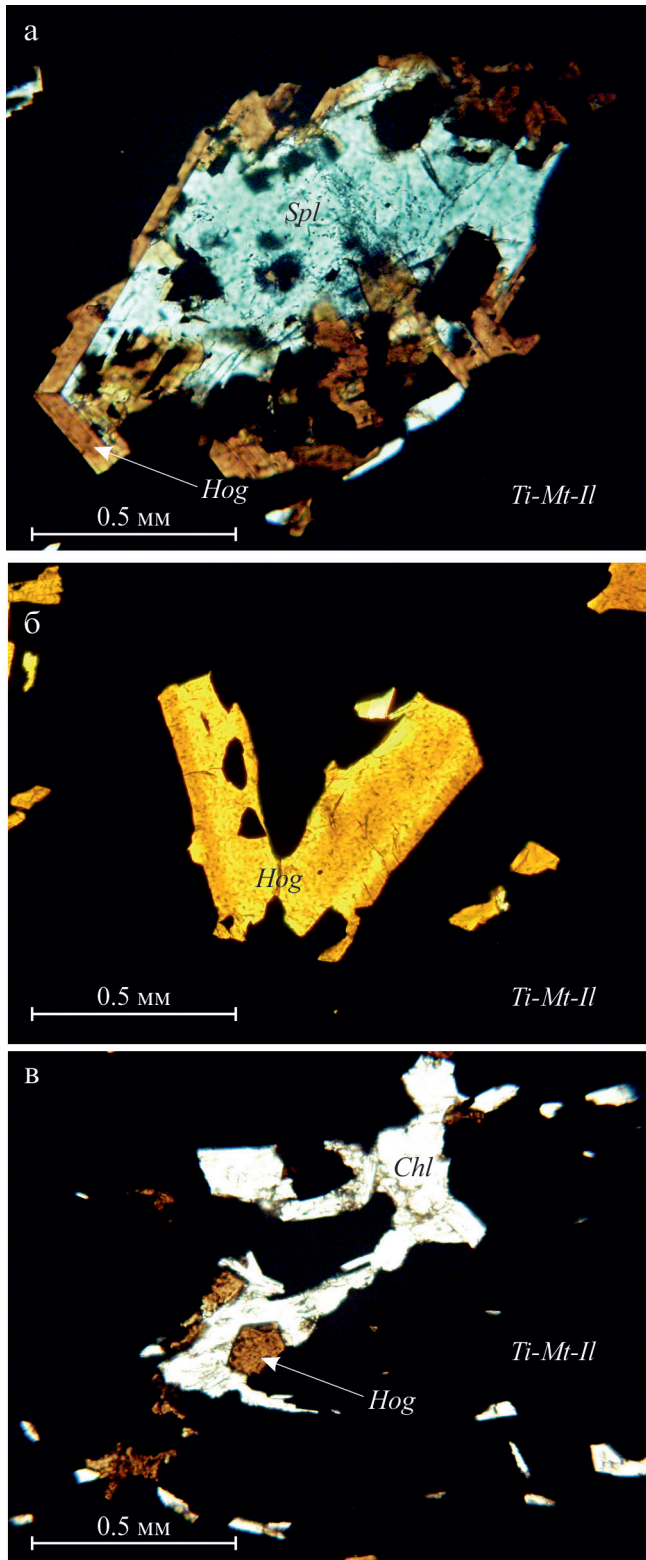


Рис. 6. Микрофотографии хёгбомита в рудах Кусинского месторождения.

а – взаимоотношение хёгбомита и шпинели, б – идиоморфные кристаллы хёгбомита среди рудных минералов, в – идиоморфный кристалл хёгбомита в интерстиционном хлорите.

Fig. 6. Microphotos of heg bomite in the Kusa deposit ores.

а – interrelation of heg bomite and spinel, б – heg bomite idiomorphic crystals among ore minerals, в – idiomorphic crystal of heg bomite in interstitial chlorite.

кристаллы хёгбомита, которые располагаются как между зернами магнетита и ильменита, так и в интерстиционном хлорите.

Установлено закономерное изменение состава хёгбомита в зависимости от позиции рудного тела в разрезе интрузии (табл. 10). Так, хёгбомит из руд центральной зоны (первая группа) при количестве Al_2O_3 (52–62%) в его составе содержит больше MgO (8.81–12.63%), Cr_2O_3 (1.63–3.67%), а также TiO_2 (до 8.9%). Здесь хёгбомит, как правило, ассоциирует с высокоглиноземистой шпинелью. Хёгбомит из рудных тел краевых зон интрузии (вторая группа) содержит больше FeO (до 26.30%) и ZnO (до 5.69%), особенно растёт содержание ZnO в одной из его генераций в рудах у подошвы массива.

Шпинель наблюдается только в рудных телах центральной части Кусинского месторождения (см. табл. 10). При этом распределение ее в рудах неравномерно, иногда присутствует только одна шпинель, иногда в парагенезисе с хёгбомитом. В рудах, где присутствует одна шпинель (обр. кс-67), она представлена двумя разновидностями. Первая, менее распространенная, – это более магниезная и обогащенная цинком шпинель с содержанием 3.0% ZnO при 25% MgO , вторая – более железистая (до 15% FeO) – обогащена Cr_2O_3 (до 1.5%). В том случае если шпинель находится в парагенезисе с хёгбомитом, то последний минерал всегда имеет более низкую железистость (см. табл. 10).

На рис. 7 показаны составы хёгбомита и шпинели из разных рудных зон в разрезе интрузии. В изученных парах хёгбомит–шпинель первый всегда имеет более высокую железистость ($f = 0.46–0.55$ против 0.36–0.46 у шпинели). Положительная корреляция между железистостью, цинком и хромом в шпинели полностью повторяется в хёгбомитах. В рудах центральной части интрузии, где присутствует только шпинель (обр. кс-67), установлено два типа шпинели. Первая, наименее распространенная, представлена своей цинксодержащей разновидностью (3.05% ZnO , $f = 0.1$), вторая – более железистой (1.77% ZnO , $f = 0.34$). Общая особенность этих шпинелей, по сравнению со шпинелями из руд с хёгбомитом, – их повышенная магниезность. Это наиболее высокотемпературная первичная шпинель. Кроме рассмотренных выше двух групп выявлена максимально железистая ($f = 0.68–0.87$) и хромистая (4.1% Cr_2O_3) разновидность хёгбомита, которая формирует скелетные кристаллы разной конфигурации в хромсодержащем хло-

Таблица 10. Состав хёгбомита и шпинели в массивных магнетит-ильменитовых рудах в зависимости от позиции рудных тел в вертикальном разрезе Кусинского массива, мас. %

Table 10. Högbohmite and spinel composition in massif magnetite-ilmenite ores in dependence on ore body position in the Kusa massive vertical section, wt %

№ п.п.		TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO*	MgO	ZnO	Сумма	FeO/(FeO + MgO)
Руды у кровли интрузии, восточный контакт									
1	hg	7.23	57.38	2.00	24.87	5.75	1.97	99.19	0.81
2	hg	6.72	55.90	1.91	26.30	5.88	1.97	98.68	0.82
3	hg	6.37	57.37	1.77	25.30	6.49	1.84	99.14	0.79
Руды из центральной рудной зоны									
4	hg	7.31	58.03	1.74	19.74	11.27	0.88	99.46	0.64
5	hg	8.50	55.16	3.00	21.17	10.32	0.91	99.59	0.67
6	hg	8.89	54.37	2.35	22.28	10.37	0.80	99.06	0.68
7	hg	8.75	52.37	3.67	22.27	10.61	0.91	98.58	0.67
8	hg	6.23	57.96	3.32	20.76	11.57	1.03	100.87	0.64
9	hg	6.65	57.84	1.88	20.07	11.58	1.08	99.10	0.63
10	hg	5.99	61.89	1.59	18.61	11.37	1.12	100.57	0.62
11	hg	5.56	59.76	2.90	19.11	11.01	1.05	99.40	0.49
12	sp	0.00	61.08	2.75	19.19	13.40	2.38	98.79	0.44
13	hg	6.42	60.76	2.76	19.22	8.81	1.25	99.22	0.55
14	sp	0.00	61.16	2.73	18.73	11.90	2.97	97.47	0.46
15	hg	6.72	59.64	1.95	18.50	9.83	1.06	97.70	0.51
16	sp	0.02	60.06	3.10	20.41	13.02	2.64	99.24	0.46
17	hg	6.81	58.18	1.63	19.50	12.63	0.49	99.70	0.61
18	sp	0.02	61.40	1.90	17.11	16.81	1.38	98.98	0.50
19	sp	0.00	67.15	0.33	4.76	25.20	3.05	100.49	0.16
20	sp	0.00	65.53	1.51	14.83	16.05	1.77	99.69	0.48
21	sp	0.00	66.93	0.24	13.17	16.96	1.73	99.56	0.44
22	sp	0.74	64.97	0.88	13.21	17.41	1.70	98.91	0.43
Руды у подошвы интрузии, западный контакт									
23	hg	5.75	56.99	2.58	25.21	4.12	4.20	99.63	0.86
24	hg	5.51	57.55	2.08	23.29	3.49	5.69	98.41	0.86
25	hg	5.39	57.20	2.05	25.87	3.85	4.70	99.06	0.87
26	hg	5.58	56.94	2.77	24.98	4.13	4.43	98.83	0.85
27	hg	5.99	57.46	2.15	23.68	3.74	5.22	98.24	0.86
28	hg	6.15	57.93	2.46	24.05	6.02	1.44	98.75	0.80
29	hg	6.02	58.64	1.81	24.16	6.57	1.51	98.72	0.78
30	hg	6.53	58.25	1.62	24.66	6.08	1.70	98.84	0.80
31	hg	6.05	58.44	1.93	24.09	6.35	1.55	98.42	0.79

Примечание. 1–3 – рудное тело, не содержащее шпинели (обр. кс-22); 4–22 – рудные тела со шпинелью: 11–18 – хёгбомит и шпинель, находящиеся в сростании друг с другом, обр. кс-95 (пары: 11–12, 13–14, 15–16), обр. кс-98 (пара 17–18), 19–22 – рудное тело со шпинелью без хёгбомита, обр. кс-67; 23–31 – рудные тела без шпинели у западного контакта: 23–27 – обр. кс-224, 28–31 – обр. кс-570. FeO* – все железо в виде FeO.

Note. Ore body without spinel (кс-22); 4-22 – ore bodies with spinel: 11–18 – hógbohmite and spinel in growth with each other, кс-95 (pairs 11–12, 13–14, 15–16); кс-98 (pair 17–18); 19–22 – ore body with spinel, without hógbohmite, кс-67; 23–31 – ore bodies without spinel near the western contact: 23–27 – кс-224, southern flange; 28–31 – кс-570 – northern flange of the deposit. FeO* – all ferrum in the form of FeO.

рите ($f = 0.28, 0.9\% \text{Cr}_2\text{O}_3, 23\% \text{Al}_2\text{O}_3$). Для сравнения приведены составы хёгбомитов из руд титаномагнетитового месторождения Лиганга (Танзания), которое залегает в массиве лейкократового габбро, расположенного в докембрийских гнейсах и сланцах (рис. 8). Здесь, как и на Кусинском месторождении, рудные пласты и линзы залегают согласно с общим простиранием массива [Zakrzewski, 1977].

На диаграммах (см. рис. 8) видно, что составы кусинских хёгбомитов из рудных тел центральной

рудной зоны и краевых зон образуют отдельные поля, как и хёгбомиты месторождения Лиганга. В хёгбомитах у основания Кусинской интрузии наблюдается прямая зависимость между содержаниями MgO и TiO₂, а также ZnO и FeO/(FeO + MgO).

Хёгбомиты из центральной части интрузии формируют совершенно иной тренд, как и месторождения Лиганга. Последние выделяются повышенным количеством MgO. В сравнении с кусинскими хёгбомиты из руд месторождения Лиганга имеют бо-

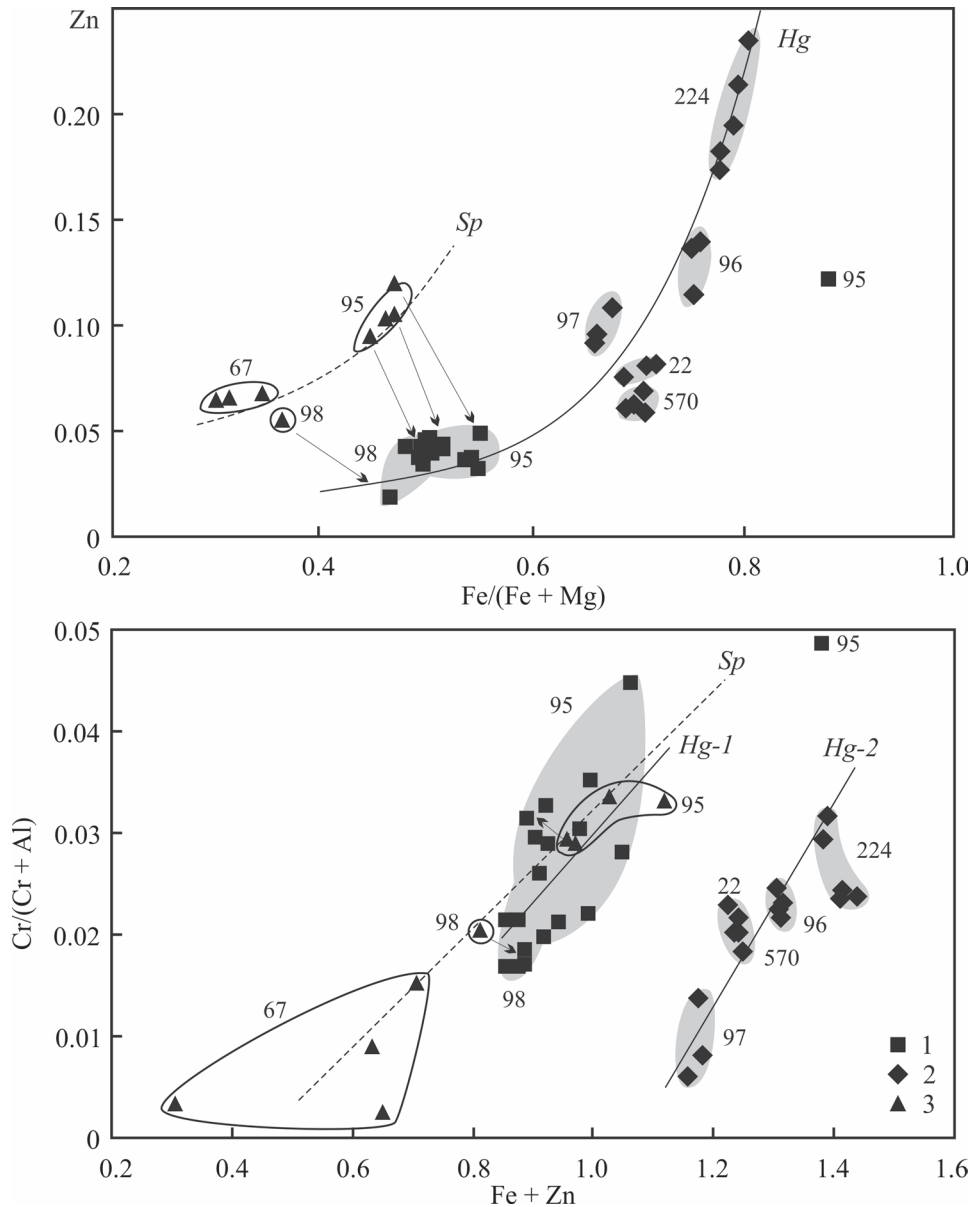


Рис. 7. Состав хёгбомита и шпинели в координатах Zn–Fe/(Fe + Mg) и Cr/(Cr + Al)–(Fe + Zn).

1 – хёгбомит первой группы, 2 – второй группы, 3 – шпинель. Цифры – номера образцов.

Fig. 7. Hřebomite and spinel compositions in Fe/(Fe + Mg)–Zn and Cr/(Cr + Al)–(Fe + Zn) coordinates.

1 – hřebomite of the first group, 2 – hřebomite of the second group, 3 – spinel. Figures – sample numbers.

лее низкие содержания Cr_2O_3 и ZnO . Хёгбомиты из руд центральной части Кусинского месторождения часто зональны по составу (табл. 11). Центральные зоны зерен, как правило, содержат несколько больше Al_2O_3 и TiO_2 при повышенной концентрации Cr_2O_3 в краях, как, впрочем, и краевые зоны магнетита. Это означает, что в ходе кристаллизации руд остаточный расплав обогащался хромом.

Таким образом, химический состав хёгбомита из рудных тел в вертикальном разрезе интрузии отражает те же общие закономерности, которые вы-

ше были выявлены для составов сосуществующих ильменита и магнетита. Эти закономерности, связанные с особенностями режима кислорода и составом рудообразующего флюида (его хлоронности), обусловлены позицией рудной зоны в вертикальном разрезе интрузии.

Рассчитанная температура кристаллизации интерстиционного хлорита в изученных образцах с хёгбомитом составила 300–340°C [Бочарникова и др., 2005; и др.]. Характер взаимоотношений хёгбомита с ильменитом, магнетитом и хлоритом ука-

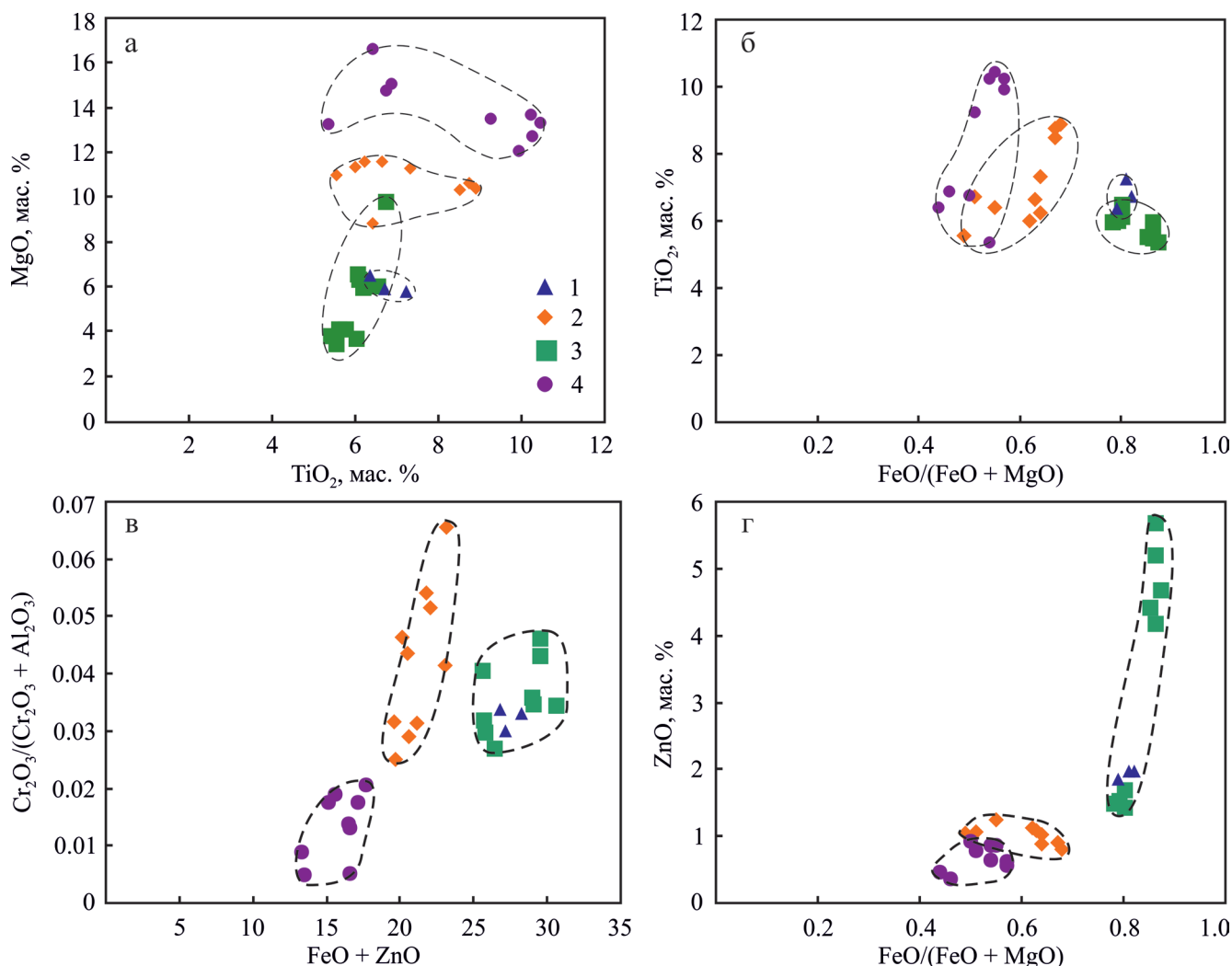


Рис. 8. Состав хёгбомита в координатах MgO–TiO₂ (а), TiO₂–FeO/(FeO + MgO) (б), Cr₂O₃/(Cr₂O₃ + Al₂O₃)–(FeO + ZnO) (в), ZnO–FeO/(FeO + MgO) (г).

1 – хёгбомит из руд у кровли интрузии; 2 – хёгбомит из руд центральной части; 3 – хёгбомит из руд у подошвы интрузии; 4 – хёгбомит из Ti–Mt руд месторождения Лиганга, Танзания [Zakrzewski, 1977].

Fig. 8. Hegboomite compositions in coordinates MgO–TiO₂ (a), TiO₂–FeO/(FeO + MgO) (б), Cr₂O₃/(Cr₂O₃ + Al₂O₃)–(FeO + ZnO) (в), ZnO–FeO/(FeO + MgO) (г).

1 – hegboomite from ores near intrusion roof; 2 – hegboomite from ores of the central part; 3 – hegboomite from ores near the intrusion foot; 4 – hegboomite from Ti–Mt ores of the deposit Liganga, Tanzania [Zakrzewski, 1977].

зывает на его кристаллизацию позднее рудных минералов, но раньше, чем кристаллизовался хлорит. Температурное поле кристаллизации кусинского хёгбомита находится в области от 600 до 300°C и общего давлении 6–7 кбар. Кристаллизация хёгбомита из руд краевых зон интрузии завершилась при температуре около 300°C, поскольку этот минерал здесь сингенетичен с более железистым, но менее глиноземистым хлоритом, а кристаллизация хёгбомита в рудах центральной зоны Кусинского месторождения заканчивалась при температуре около 340°C, на что указывает его парагенезис с менее железистым, но более глиноземистым хлоритом.

В целом можно сделать заключение о том, что кристаллизация рудных тел в Кусинской интрузии завершилась в температурном диапазоне 300–340°C.

Наряду с хёгбомитом и шпинелью в рудах Кусинского месторождения присутствует и такой весьма редкий минерал, как эсколаит (природный оксид хрома – Cr₂O₃), а также в очень малых количествах бадделейт – ZrO₂. Характеристика этих минералов уже дана [Бочарникова, Воронина, 2008; Бочарникова и др., 2010]. Распределение в рудах эсколаита неравномерное: одни участки насыщены им, на других его нет. Размер зерен очень мал и составляет в основном 10–15 мкм, реже 20 мкм.

Таблица 11. Состав зональных хёгбомитов в массивных магнетит-ильменитовых рудах центральной части Кусинского месторождения, мас. %**Table 11.** Compositions of zonal hogbomites in massive magnetite-ilmenite ores of the Kusa deposit central part, wt %

№ п.п.	Обр.	Зона	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO*	MgO	ZnO	Сумма
1	кс-95	Центр	5.45	63.68	0.68	15.96	11.14	1.56	98.47
		Край	5.34	60.21	2.57	15.98	11.47	1.46	97.02
2		Центр	8.89	54.37	2.35	22.28	10.37	0.80	99.06
		Край	8.75	52.37	3.67	22.27	10.61	0.91	98.58
3		Центр	7.31	58.03	1.74	19.74	11.27	0.88	98.97
		Край	6.64	55.41	2.60	20.41	11.30	0.98	97.34
4		Центр	6.65	57.84	1.88	20.07	11.58	1.08	99.10
		Край	8.50	55.16	3.00	21.17	10.32	0.91	99.06
5	кс-98	Центр	7.20	60.38	1.56	19.36	11.11	1.00	100.61
		Край	6.97	58.88	2.35	19.57	10.97	1.08	99.82
6		Центр	6.91	61.41	1.97	18.56	11.35	1.03	101.23
		Край	6.74	59.34	2.64	19.99	10.82	1.09	100.62

В составе эсколаита присутствуют такие элементы-примеси, как Fe, Ti, Al, Ca, Mg, Mn, V, Si. Четко прослеживается изоморфизм между Cr₂O₃ и Fe₂O₃, а также Fe₂O₃ и TiO₂ в обратно пропорциональном отношении друг к другу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ распределения Cl и F в сосуществующих апатите, амфиболе и ставролите из околорудных пород показал, что в содержании Cl и F в этих минералах из рудных тел разных горизонтов интрузии имеются существенные различия. Наиболее обогащены хлором (до 4.1%) апатиты из околорудных пород центральной части Кусинского месторождения. В апатитах из околорудных пород приконтактных зон содержания хлора существенно понижены, они не превышают 2% Cl. При этом в апатитах у основания интрузии хлора содержится несколько больше, чем в апатитах у ее кровли. Та же закономерность проявилась в содержании Cl и F в амфиболе и ставролите. Следует отметить, что в пределах одного рудного тела во всех случаях апатит из подрудных пород содержит больше хлора по сравнению с надрудными, а надрудные – больше фтора.

Из этого следует, что распределение компонентов в сосуществующих апатите, амфиболе и ставролите из околорудных пород в разрезе интрузии подчиняется одним и тем же закономерностям. С одной стороны, это тренд, характеризующий распределение компонентов по вертикали (низ–верх), который может служить доказательством того, что рудные зоны с рудными телами формировались синхронно со становлением самой интрузии, залегавшей на тот момент горизонтально. Другой тренд – это “симметричная” зональность (край–центр–край), которая определяется присутствием в центральной части интрузии рудоносного флюида

ида с более высокой концентрацией хлора. Поэтому здесь рассмотренный выше минеральный парагенезис отличается повышенным содержанием Cl и MgO в сравнении с рудными зонами у контактов интрузии.

При изучении галогенов в апатитах неизменного двупироксенового габбро подтвержден магматический источник хлора в составе рудообразующего флюида.

Изначально расплав, из которого формировалась Кусинская интрузия (Кусинское месторождение), был флюидонасыщенным и высокохлористым. Установлены три группы апатитов с разными концентрациями Cl и F. В первой Cl > F, вторая – промежуточная, в третьей Cl < F. Присутствие апатитов этих групп в виде включений в плагиоклазе свидетельствует об одновременном существовании в расплаве флюидных фаз с различными концентрациями хлора от 0.9 до 2% и фтора от 0.14 до 1.7% (наблюдение в пределах одного шлифа). Зерна апатита были захвачены при кристаллизации плагиоклаза, что подтверждает их первично магматогенную природу. Галогенсодержащая флюидная фаза, состав которой отражен близкими содержаниями Cl и F в апатитах из свежего и измененного габбро, принимала участие в формировании единого рудоносного флюида, что является доказательством единства процессов породо- и рудообразования. Но только под воздействием высококонцентрированного богатого хлором флюида происходили мобилизация, перераспределение и сегрегация рудного вещества, ранее находившегося в расплаве и породах в рассеянном состоянии, с последующим формированием рудных слоев, прослоев, а затем и более крупных рудных масс. Этот богатый хлором флюид определил околорудные преобразования пород, их кислотное выщелачивание, обеспечивающее дополнительный привнос железа в руд-

ный флюид, а также образование таких высокоглиноземистых минералов, как ставролит, корунд, кианит, хёгбомит и др.

Близкие значения TiO_2/FeO в габбро-норитах, в массивных магнетит-ильменитовых рудах и в околорудных хлорит-гранат-амфиболовых породах Кусинского месторождения также указывает на единый магматический источник этих образований. Отношение TiO_2/FeO в габбро-норитах составляет 0.17–0.19, в околорудных метасоматитах – 0.17–0.20, в массивных магнетит-ильменитовых рудах – 0.19–0.20. При этом в низкотитанистых габбро-анортозитовых ритмах это отношение существенно ниже – 0.08–0.12, а в габбро-норитах другого, более глубинного юго-восточного, блока значительно выше – 0.30–0.45.

Расслоение галоген-составляющей флюидной фазы привело к формированию на отдельных горизонтах интрузии рудных зон с более высокими концентрациями хлора. Особенно обогащенной хлором стала центральная рудная зона с рудными телами наибольшей мощности. Эти особенности в химическом составе массивных руд, в составе рудных и флюидсодержащих минералов по разрезу Кусинского месторождения схематически отражены на рис. 9.

Сопоставление обенностей распределения галогенов в апатитах таких расслоенных плутонов, как Стилутер и Бушвельд, во много раз превышающих по мощности Кусинский массив, с апатитами Кусинской расслоенной интрузии показывает, что у первых хлор в максимальной степени (до 7.0%) концентрируется в глубинных частях массивов [Boudreau et al., 1986, Boudreau, McCallum, 1989]. В Кусинской интрузии эта закономерность наблюдается в интервале разреза интрузии *центр–кровля*. Именно в центральной рудной зоне галогенсодержащие минералы околорудных пород (апатит, амфибол, ставролит) содержат максимальное количество хлора.

В распределении галогенов вверх по разрезу Кусинского расслоенного массива нет аналогии с типичными классическими расслоенными плутонами. Одна из причин – это несопоставимые мощности разрезов: кусинский разрез – это всего лишь 0.8–1.0 км, а Бушвельд, например, имеет мощность около 10 км. Поэтому именно центральная зона интрузии оказалась максимально флюидонасыщенной и обогащенной хлором, что и обусловило здесь наибольшую интенсивность рудообразующего процесса, сформировавшего значительно более крупные рудные тела.

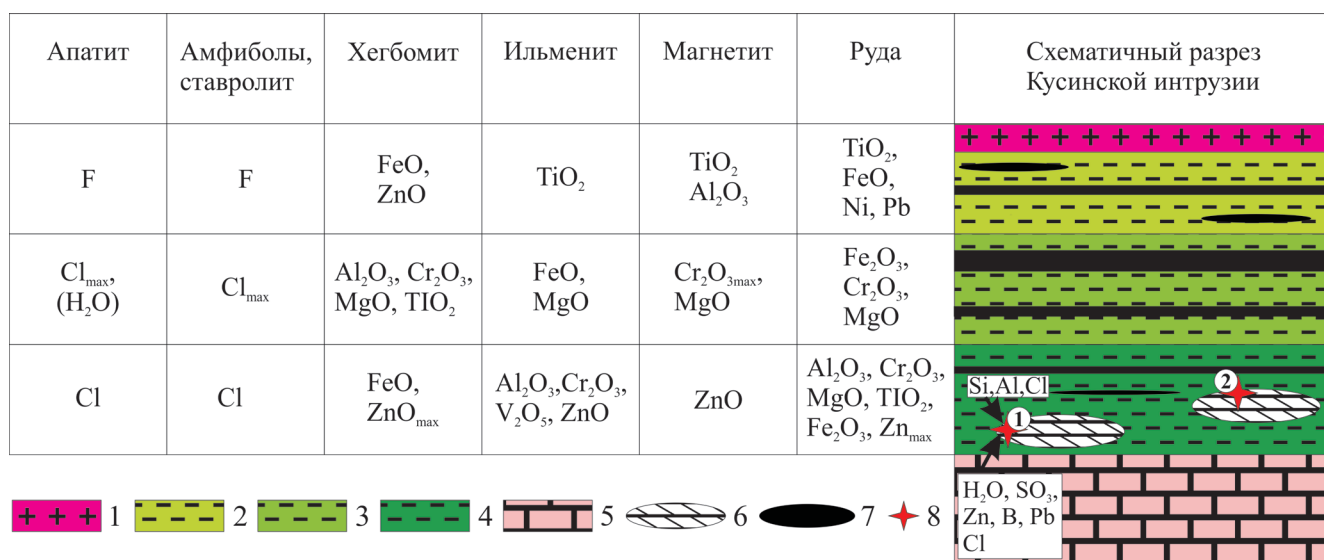


Рис. 9. Схема общих закономерностей в изменении химического и минерального состава рудных зон в зависимости от их позиции в вертикальном разрезе Кусинского месторождения.

1 – граниты Губенского массива; 2–4 – Кусинский массив: 2 – кровля, 3 – центр, 4 – подошва; 5 – карбонатные породы (известняки, доломиты) саткинской свиты; 6 – скарнированные карбонатные породы (ксенолиты); 7 – рудные тела; 8 – минеральные копи в скарнах: 1 – Зеленцовская, 2 – Ахматовская.

Fig. 9. Scheme of general regularities in chemical and mineral composition variation of ore zones in dependence on their position in vertical section of the Kusa deposit.

1 – granites of the Gubensky massif; 2–4 – the Kusa massif: 2 – roof, 3 – center, 4 – foot; 5 – carbonate rocks (limestones, dolomites) of Satka Formation; 6 – scarned carbonate rocks (xenoliths); 7 – ore bodies; 8 – mineral mines in scarns: 1 – Zelentsovskaya, 2 – Akhmatovskaya.

Как известно, в основании Кусинского месторождения присутствуют (схематически показано на рис. 9) крупные, пластообразные зоны развития скарнов, сформировавшиеся в результате реакции флюидизированного магматического расплава с ксенолитами доломитов саткинской свиты нижнего рифея, подстилающей Кусинский массив. С этими зонами скарнирования ассоциируют многочисленные минеральные копи, к которым относятся и широко известные Ахматовская и Зеленцовская (см. рис. 9).

Эти и многие другие минеральные копи в контактовых зонах интрузий кусинско-копанского комплекса отличаются удивительным разнообразием минералов, имеющих музейную и ювелирную ценность. К таким минералам в Ахматовской копии относятся музейные штуфы граната, эпидота, везувиана, клинохлора, а также перовскит, шпинель, сфен, циркон, апатит, скаполит, разновидности эпидота: букландит и багратионит и мн. др. Не менее богаты разнообразием минералов и другие минеральные копи.

Сравнительный анализ состава галогенов в апатитах из различных копей кусинско-копанского интрузивного комплекса показал [Бочарникова и др., 2011], что апатиты Ахматовской копии, расположенной среди скарнов вблизи основания Кусинского массива, характеризуются относительно высокими содержаниями хлора (до 0.35% при содержании 0.38–0.90% F). Но более высокое содержание хлора имеют апатиты в скарнах Зеленцовской копии, расположенной в более северной части Кусинского массива [Шагалов и др., 2017]. Здесь количество Cl в апатитах составляет 1–1.5%, при 0.4–0.6% F. Следует отметить, что в составе апатита наблюдается очень высокое содержание сульфата серы, варьирующее в диапазоне 1.5–5.5% SO₃. Вхождение такого количества шестивалентной серы в структуру апатита вместо пентавалентного фосфора компенсируется присутствием до 4.6% в его составе кремнезема и ванадия (до 1.4% V₂O₃). Наряду с этим в везувиан-гранат-форстерит-кальцитом скарне этой копии обнаружен ангидрит – в виде включений в форстерите. Амфибол здесь образует зональные кристаллы с чередованием зон: от актинолита с низким количеством хлора (0.18%) к ферропаргаситам (1.30–1.70% Cl) и далее к ферроэднитам и Cl-гастингситам (3–4.5% Cl), образующим внешние зоны кристаллов.

Эти данные свидетельствуют о том, что образование скарнов (копей) происходило с участием флюидов, связанных с процессом становления Кусинской интрузии. При нем ассимилированные нижнерифейские карбонатные толщи, насыщенные рассолами, стали дополнительным источником поступления в расплав таких компонентов, как Cl, а также Na, Ca, и др. Они в значительной степени повысили флюидонасыщенность расплава и генера-

цию рудообразующих флюидов и, как следствие, рудоносность Кусинской интрузии.

Роль щелочных металлов, которые также способствуют росту окислительных свойств силикатных расплавов и дальнейшей их ферритизации, была показана [Павлов, 1983]. Этим установлена прямая зависимость роста степени окисленности железа в породах от возрастания содержания в них щелочей.

Одновременно в зону скарнообразования с расплавами могла привноситься сульфатная сера [Крупенин и др., 2013], а также бор [Бочарникова и др., 2011], возможно и Zn, учитывая наличие барит-полиметаллического оруденения в рифейских толщах Башкирского мегантиклинория.

Подтверждается и ранее сделанный вывод [Ферштатер и др., 2001, 2005] о том, что сходство в строении и составе кайм вокруг породообразующих рудных минералов в габбро-норитах с околорудными реакционными ореолами свидетельствует об однотипном механизме и близких неравновесных условиях их образования.

Важно, что изучение состава галогенов во флюидсодержащих минералах в вертикальном разрезе интрузии показало, что еще на магматическом уровне произошло расслоение галогенсоставляющей флюидной фазы (Cl, F), с участием которой в дальнейшем шли процессы формирования как петрологической расслоенности, так и рудных зон с различной концентрацией Cl в рудообразующем флюиде и, как следствие, образование различных по химическому составу руд и минералов, слагающих эти руды.

Работа выполнена в рамках темы 0393-2016-0020 государственного задания ИГГ УрО РАН, № гос. рег. АААА-А18-118052590029-6, и в рамках проекта УрО РАН (0393-2018-0027), № гос. рег. АААА-А18-118052590034-0.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев А.А., Алексеева Г.В., Ковалев С.Г. (1992) Кусинско-Копанский расслоенный комплекс: новые данные, представления и перспективы. Уфа: БНЦ УрО РАН, 20 с.
- Алексеев А.А., Алексеева Г.В., Ковалев С.Г. (2000) Расслоенные интрузии Западного склона Урала. Уфа: Гилем, 188 с.
- Бочарникова Т.Д. (2009) Галогены в габбро-норитах Кусинской и Копанской интрузий и их роль в петро-и рудогенезе. *Ежегодник-2008*. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 156, 129-131.
- Бочарникова Т.Д., Воронина Л.К. (2008) Первая находка эсколаита в магнетит-ильменитовых рудах Кусинской габбровой интрузии. *Ежегодник-2007*. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 226-229.
- Бочарникова Т.Д., Главатских С.П., Холоднов В.В. (2010) Находка бадделеита в магнетит-ильменитовых ру-

- дах Кусинской габбровой интрузии (Южный Урал). *Вестник Уральского отделения Российского минералогического общества*, (7). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 11-13.
- Бочарникова Т.Д., Прибавкин С.В., Холоднов В.В., Воронина Л.К. (2005) Хёгбомит из ильменит-магнетитовых руд Кусинского массива (Южный Урал). *Записки РМО*, (2), 84-90.
- Бочарникова Т.Д., Холоднов В.В., Воронина Л.К. (2003) Специфика состава галогенсодержащего флюида в рудоносных габброидах Кувашско-Машакской рифтогенной структуры (Южный Урал). *Материалы V Республиканской геологической конференции "Геология и перспективы расширения сырьевой базы Башкортостана и сопредельных территорий"*, (2). Уфа: ИГ УНЦ РАН, 109-111.
- Бочарникова Т.Д., Холоднов В.В., Воронина Л.К. (2005) Закономерное изменение состава ильменита и магнетита из рудных залежей в разрезе Кусинского габбрового массива. *Ежегодник -2004*. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 313-317.
- Бочарникова Т.Д., Холоднов В.В., Воронина Л.К. (2006) Особенности распределения галогенов в сосуществующих апатите, амфиболе и ставролите из рудных зон Кусинской интрузии. *Ежегодник-2005*. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 143-146.
- Бочарникова Т.Д., Холоднов В.В., Прибавкин С.В., Воронина Л.К. (2003) Распределение галогенов в расслоенных габброидах Кусинской интрузии. *Ежегодник-2002*. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 224-227.
- Бочарникова Т.Д., Холоднов В.В., Шагалов Е.С. (2011) Состав и источники флюидов в скарнах минеральных копей Кусинско-Копанского комплекса (Южный Урал). *Литосфера*, (5), 124-130.
- Гонгальский Б.И., Криволицкая Н.А. (1993) Чинейский расслоенный плутон. Новосибирск: Наука, 181 с.
- Гонгальский Б.И., Криволицкая Н.А., Арискин А.А., Николаев Г.С. (2008) Строение, состав и формирование Чинейского анортозит-габбро-норитового массива в северном Забайкалье. *Геохимия*, (7), 1-30.
- Иванов О.К. (2004) Вариации состава титаномагнетита по разрезу одного из пластов Копанской расслоенной интрузии, Ю. Урал. *Уральский геологический журнал*, (3). Екатеринбург, 69-80.
- Карпова О.В. (1974) Титаномагнетитовые руды Южного Урала. М.: Наука, 152 с.
- Кравцова Л.И. (1963) Геологическое строение и история формирования Копанского габбрового массива на Южном Урале. *Магматизм, метаморфизм, металлогения Урала. Тр. Первого Уральского петрограф. совещ.* Свердловск: ГГИ УФАИ СССР, 467-480.
- Крупенин М.Т., Гараева А.А., Клюкин Ю. И., Балтыбаев Ш.К., Кузнецов А.Б. (2013) Флюидный режим магнетитового метасоматоза на Саткинских месторождениях Южно-Уральской провинции (термокриометрия флюидных включений). *Литосфера*, (2), 120-134.
- Мальшев И.И., Пантелеев П.Г., Пэк А.В. (1934) Титаномагнетитовые месторождения Урала. Л.: Изд-во АН СССР, 272 с.
- Мясников В.С. (1959) Некоторые особенности месторождений титаномагнетитовых руд Южного Урала и проявления в них метаморфизма. *Геология рудн. месторождений*, (2), 49-62.
- Мясников В.С., Николаева Е.Г., Карпова О.В. (1970) Минеральный состав орто-амфиболитов Кусинского массива (Южный Урал). *Минералы базитов в связи с вопросами петрогенезиса*. М.: Наука, 134-149.
- Павлов А.Л. (1983) Генезис магматических магнетитовых месторождений. Новосибирск: Наука, 204 с.
- Прибавкин С.В., Бородин Н.С., Ферштатер Г.Б., Холоднов В.В., Бочарникова Т.Д. (2003) Околорудные высокобарические минеральные ассоциации в Кусинском габбровом массиве (Южный Урал). *Докл. АН*, **391**(1), 95-98.
- Титаномагнетитовые месторождения Урала. (1936) Ч. 2. М.: Изд-во АН СССР, 176 с.
- Уиллемз Дж. (1973) Ванадистые магнетитовые руды Бушвельдского комплекса. *Магматические рудные месторождения*. М.: Недра, 129-150.
- Уэйджер Л., Браун Г. (1970) Расслоенные изверженные породы. М.: Мир, 551 с.
- Ферштатер Г.Б., Холоднов В.В., Бородин Н.С. (2001) Условия формирования и генезис рифейских ильменит-титаномагнетитовых месторождений Урала. *Геология рудн. месторождений*, **43**(2), 112-128.
- Ферштатер Г.Б., Холоднов В.В., Прибавкин С.В., Бородин Н.С., Бочарникова Т.Д., Готтман И.А. (2005) Рифтогенный магматизм и железоруднение Южного Урала. *Геология рудн. месторождений*, **47**(5), 421-443.
- Фоминых В.Г. (1968) Титаномагнетиты пород Кусинской габбро-диабазовой интрузии. *Минералы месторождений полезных ископаемых Урала*. Свердловск: УФАИ СССР, 24-27.
- Фоминых В.Г., Андреев М.И. (1970) Корундовый амфиболит Кусинского Месторождения. *Ежегодник-1969*. Свердловск: УФАИ СССР, 155-159.
- Формации титаномагнетитовых руд и железистых кварцитов: железорудные месторождения Урала. (1984) (Отв. ред. А.М. Дымкин). Свердловск: УНЦ АН СССР, 264 с.
- Холоднов В.В., Бочарникова Т.Д., Прибавкин С.В. (2002) Петрохимическая характеристика пород расслоенной серии Кусинского месторождения. *Ежегодник-2001*. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 141-147.
- Холоднов В.В., Бочарникова Т.Д., Шагалов Е.С. (2012) Состав, возраст и генезис магнетит-ильменитовых руд среднерифейского стратифицированного Медведевского массива (кусинско-копанский комплекс Южного Урала). *Литосфера*, (5), 145-165.
- Холоднов В.В., Бушляков И.Н. (2002) Галогены в эндогенном рудообразовании. Екатеринбург: УрО РАН, 395 с.
- Холоднов В.В., Ферштатер Г.Б., Ронкин Ю.Л., Бородин Н.С., Прибавкин С.В., Лепихина О.П. (2010). Sm-Nd-, Rb-Sr-возраст габброидов, гранитоидов и титаномагнетитовых руд из расслоенных интрузий кусинско-копанского комплекса (Южный Урал). *Докл. АН*, **432**(5), 650-654.
- Холоднов В.В., Шагалов Е.С., Бочарникова Т.Д., Коновалова Е.В. (2015) Состав и условия формирования Ti-Fe-V оруденения в двупироксеновом габбро Медведевского месторождения (Ю. Урал). Ч. I. Петрохимическая и геохимическая характеристика пород и руд. *Литосфера*, (6), 69-83.
- Холоднов В.В., Шагалов Е.С., Бочарникова Т.Д., Коновалова Е.В. (2016) Состав и условия формирования

- Ti-Fe-V оруденения в двупироксеновом габбро Медведевского месторождения (Ю. Урал). Ч. II. Стадийность рудообразования как результат эволюции рудоносного расплава. *Литосфера*, (2), 48-69.
- Шагалов Е.С., Сустанов С.Г., Холоднов В.В. (2017) Высокохлорные и сульфатные ассоциации минералов в породах кусинско-копанского комплекса. *Уральская минералогическая школа-2017. Сб. ст. студентов, аспирантов, научных сотрудников, преподавателей вузов геологического профиля*. Екатеринбург: ИГ УрО РАН, 233-237.
- Шарков Е.В. (2006) Формирование расслоенных интрузивов и связанного с ними оруденения. М.: "Научный мир", 365 с.
- Штейнберг Д.С., Кравцова Л.И., Варлаков А.С. (1959) Основные черты геологического строения Кусинской габбровой интрузии и залегающих в ней рудных месторождений. *Труды горно-геологического института*, (40), 13-40.
- Boudreau A.E., Mathez E.S., Mc Callum L.S. (1986) Galogen geochemistry of the Stillwater and Bushveld complexes: evidence for transport of the platinum-group elements by Cl- rich fluids. *J. Petrol.*, **27**(4), 967-986.
- Boudreau A.E., Mc Callum L.S. (1989) Investigations of the Stillwater Complex: Pt V. Apatites as indicators of evolving fluid composition. *Contrib. Miner. Petrol.*, **102**(2), 138-153.
- Sun S.S. (1982) Chemical composition and origin of the Farth's primitive mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **46**, 179-192.
- Zakrzewski M.A. (1977) Hgbomite from the Fe-Ti deposit of Liganga (Tansania). *Neues Jahrb. Mineral. Monatsh.*, 373-380.
- Alexeev A.A., Alexeeva G.V., Kovalev S.G. (1992) *Kusinsko-Kopanskii rassloennyi complex: novye dannye, predstavleniya i perspektivy* [Kusa-Kopansky laminated complex: new data, views and perspectives]. Ufa, BSC UB RAS, 240 p. (In Russian)
- Alexeev A.A., Alexeeva G.V., Kovalev S.G. (2000) *Rassloennye intruzii Zapadnogo sklona Urala* [Laminated intrusions of the Urals western slope]. Ufa, Gilem Publ., 20 p. (In Russian)
- Bocharnikova T.D. (2009) Halogens in gabbro-norites of the Kusa and Kopan intrusions and their role in petro- and ore-genesis. *Ezhegodnik-2008*. Proc., IGG UB RAS, **156**, 129-131. (In Russian)
- Bocharnikova T.D., Glavatskikh S.P., Kholodnov V.V. (2010) Baddeleyite find in magnetite-ilmenite ores of the Kusa gabbro intrusion (Southern Urals). *Vestnik Ural'skogo otdeleniya Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva*, (7). Ekaterinburg, IGG UB RAS, 11-13. (In Russian)
- Bocharnikova T.D., Kholodnov V.V., Pribavkin S.V., Voronina L.K. (2003) Halogen distribution in laminated gabbroids of the Kusa intrusion. *Ezhegodnik-2002*. Ekaterinburg, IGG UB RAS, 224-227. (In Russian)
- Bocharknikova T.D., Kholodnov V.V., Shagalov E.S. (2011) Composition and sources of fluids in skarns of mineral mines of the Kusa- Kopan complex (Southern Urals). *Litosfera*, (5), 124-130. (In Russian)
- Bocharnikova T.D., Kholodnov V.V., Voronina L.K. (2003) A specific character of halogen-containing fluid of ore-bearing gabbroids of the Kuvash-Mashak riftogenic structure (the Southern Urals). *Materialy V Respublikanskoi geologicheskoi konferentsii "Geologiya i perspektivy rasshireniya syr'evoi bazy Bashkortostana i sopredel'nykh territorii"* [Materials of the V Republic Geological Conference "Geology and perspectives of widening the raw material base of Bashkortostan and the adjacent territories"], (2), Ufa, BSC UB RAS, 109-111. (In Russian)
- Bocharnikova T.D., Kholodnov V.V., Voronina L.K. (2005) Regular variation of the ilmenite and magnetite composition from ore deposits in the Kusa gabbro massif profile. *Ezhegodnik-2004*. Ekaterinburg, IGG UB RAS, 313-217. (In Russian)
- Bocharnikova T.D., Kholodnov V.V., Voronina L.K. (2006). Particularities of the halogen distribution in co-existing apatite, amphibole and staurolite from the Kusa intrusion ore zones. *Ezhegodnik-2005*. Ekaterinburg, IGG UB RAS, 143-146. (In Russian)
- Bocharnikova T.D., Pribavkin S.V., Kholodnov V.V., Voronina L.K. (2005) Hgbomite from ilmenite-magnetite ores from the Kusa massif (Southern Urals). *Zapiski RMO*, (2), 84-90. (In Russian)
- Bocharnikova T.D., Voronina L.K. (2008). The first find of eskolaite in magnetite-ilmenite ores of the Kusa gabbro intrusion. *Ezhegodnik-2007*. Ekaterinburg, IGG UB RAS, 226-229. (In Russian)
- Boudreau A.E., Mathez E.S., Mc Callum L.S. (1986) Galogen geochemistry of the Stillwater and Bushveld complexes: evidence for transport of the platinum-group elements by Cl- rich fluids. *J. Petrol.*, **27**(4), 967-986.
- Boudreau A.E., Mc Callum L.S. (1989) Investigations of the Stillwater Complex: PtV. Apatites as indicators of evolving fluid composition. *Contrib. Miner. Petrol.*, **102**(2), 138-153.
- Fershtater G.B., Kholodnov V.V., Borodina N.S. (2001) Conditions of formation and genesis of the Riphean ilmenite titanomagnetite deposits of the Urals. *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **3**(2), 112-128. (In Russian)
- Fershtater G.B., Kholodnov V.V., Pribavkin S.V., Borodina N.S., Bocharnikova T.D., Gottman I.A. (2005) Riftogenic magmatism and ferro-mineralization of the Southern Urals. *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **47**(5), 421-443. (In Russian)
- Fominikh V.G. (1968) Titanomagnetites of the Kusa gabbro-diorite intrusion. *Mineraly mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh Urala* [Minerals of the Urals fossil deposits]. Sverdlovsk, UB AS SSSR, 155-159. (In Russian)
- Fominikh V.G., Andreev M.I. (1970) Corund amphibolite of the Kusa deposit. *Ezhegodnik 1969 (osnovnye rezul'taty rabot 1969 goda)*. Sverdlovsk, UB AS USSR, 155-159. (In Russian)
- Formatsii titanomagnetitovykh rud i zhelezistykh kvartsitov: zhelezorudnye mestorozhdeniya Urala* [Formations of titanomagnetite ores and ferruginous quartzites: iron ore deposits of the Uals]. (1984) (Chief ed. A.M. Dymkin). Sverdlovsk, UF AS USSR, 264 p. (In Russian)
- Gongalskii B.I., Krivolutskaya N.A. (1993) *Chaineiskii rassloennyi pluton* [The Chinese laminated pluton]. Novosibirsk, Nauka Publ., 181 p. (In Russian)
- Gongalskii B.I., Krivolutskaya N.A., Ariskin A.A., Nikolaev G.S. (2008) Structure, composition and formation

- of the Chinese anorthosite gabbro-norite massif in northern Trans-Baikal. *Geokhimiya*, (7), 1-30. (In Russian)
- Ivanov O.K. (2004) Titano-magnetite composition variations on the profile of one of the layers of the Kopan laminated intrusion, S. Urals. *Ural'skii geologicheskii zhurnal*, (3), Ekaterinburg, 69-80.
- Karpova O.V. (1974) *Titanomagnetitovye rudy Yuzhno-go Urala* [Titanomagnetite ores of the Southern Urals]. Moscow, Nauka Publ., 152 p. (In Russian)
- Kholodnov V.V., Bocharnikova T.D., Pribavkin S.V. (2002) Petrochemical characteristics of the Kusa deposit laminated series rocks. *Ezhegodnik-2001*. Ekaterinburg, IGG, UB RAS, 141-147. (In Russian)
- Kholodnov V.V., Bocharnikova T.D., Shagalov E.S. (2012) Composition, age and genesis of magnetite-ilmenite ores of middle-Riphean stratified Medvedevsky massif (the Kusa-Kopansky complex of the Southern Urals). *Litosfera*, (5), 145-165. (In Russian)
- Kholodnov V.V., Bushlyakov I.N. (2002). *Galogeny v endogennom rudoobrazovanii* [Halogens in endogenic ore formation]. Ekaterinburg, UB RAS, 395 p. (In Russian)
- Kholodnov V.V., Fershtater G.B., Ronkin Yu.L., Borodina N.S., Pribavkin S.V., Lepikhina O.P. (2010) Sm-Nd-Rb-Sr- age of gabbroids, granitoids and titanomagnetite ores from laminated intrusions of the Kusa-Kopansk complex (the Southern Urals). *Dokl. Akad. Nauk*, **432**(5), 650-654. (In Russian)
- Kholodnov V.V., Shagalov E.S., Bocharnikova T.D., Konovalova E. V. (2015) Composition and conditions of Ti-Fe-V mineralization in bipyroxene gabbro of Medvedevsky deposit (the Southern Urals). Pt I. Petrochemical and geochemical characteristics of rocks and ores. *Litosfera*, (6), 69-83. (In Russian)
- Kholodnov V.V., Shagalov E.S., Bocharnikova T.D., Konovalova E.V. (2016) Composition and conditions of Ti-Fe-V mineralization in bipyroxene gabbro of Medvedevsky deposit (the SouthernUrals). Pt II. Stageness of ore-formation as a result of evolution of ore-bearing fusion. *Litosfera*, (2), 48-69. (In Russian)
- Kravtsova L.I. (1963) Geological structure and history of formation of the Kopan gabbro massif in the Southern Urals. *Magmatizm, metamorfizm, metallogeniya Urala*. Tr. Pervogo Ural'skogo petrograficheskogo soveshchaniya [Magmatism, metamorphism, metallogeny of the Ural. Proc. of the first Uralian petrographic conference], (1). Sverdlovsk, UB AS USSR, 467-480. (In Russian)
- Krupenin M.T., Garayeva A.A., Kl'ukin Yu.I., Baltybaev Sh.K., Kuznetsov A.B. (2013) Fluid regime of magnetite metasomatism at the Satka deposits of South-Uralian province (termocriometry of fluid inclusions). *Litosfera*, (2), 120-134. (In Russian)
- Malyshev I.I., Panteleev P.G., Pek A.V. (1934) *Titano-magnetitovye mestorozhdeniya Urala* [Titanomagnetite deposits of the Urals]. Leningrad, AS USSR Publ., 272 p. (In Russian)
- Myasnikov V.S. (1959) Some particularities of the deposits of titano-magnetite ores of the Southern Urals and metamorphism manifestation in them. *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, (2), 49-62. (In Russian)
- Myasnikov V.S., Nikolayeva E. G., Karpova O.V. (1970) Mineral composition of the Kusa massif orthoamphibolites (the Southern Urals). *Mineraly bazitov v sv'azi s voprosami petrogenezisa* [Basite minerals in connection with petrogenesis problems]. Moscow, Nauka Publ., 34-149. (In Russian)
- Pavlov A.L. (1983) *Genezis magmaticheskikh magnetitovykh mestorozhdenii* [Genesis of magmatic magnetite deposits]. Novosibirsk, Nauka Publ., 204 p.
- Pribavkin S.V., Borodina N.S., Fershtater G.B., Kholodnov V.V., Bocharnikova T.D. (2003) Near-ore high-barite mineral associations in the Kusa gabbro massif (Southern Urals). *Dokl. Akad. Nauk*, **391**(1), 95-98. (In Russian)
- Shagalov E.S., Sustavov S.G., Kholodnov V.V. (2017) High-chlorine and sulfate mineral associations in the Kusa-Kopansk complex rocks. *Ural'skaya mineralogicheskaya shkola – 2017. Sb. Statei studentov, aspirantov, nauchnykh sotrudnikov, prepodavatelei vuzov geologicheskogo profilya* [Uralian mineralogical school-2017. Collection of papers of students, post-graduates, scientific collaborators and HEE teachers of geological profile]. Ekaterinburg, IGG UB RAS, 233-237. (In Russian)
- Sharkov E.V. (2006) *Formirovanie rassloennykh intruzivov i svyazannogo s nimi orudneniya* [Formation of laminated intrusives and associated mineralization]. Moscow, "Nauchnyi mir" Publ., 365 p. (In Russian)
- Shteinberg D.S., Kravtsova L.I., Varlakov A.S. (1959) Main features of geological structure of the Kusa gabbro intrusion and the ore deposits, occurring in it. *Trudy gornogeologicheskogo Instituta*, (40), 13-40. (In Russian)
- Sun S.S. (1982) Chemical composition and origin of the Farths primitive mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **46**, 179-192.
- Titano-magnetitovye mestorozhdeniya Urala* [Titanomagnetite deposits of the Urals]. (1936) Pt 2. Moscow, AS USSR Publ., 176 p. (In Russian)
- Ueizher L., Braun G. (1970) *Rassloennye izverzhennye porody* [Laminated eruptive rocks]. Moscow, Mir Publ., 551 p. (In Russian)
- Uillemz Dzh. (1973) Vanadium magnetite ores of the Bushveld complex. *Magmaticheskie rudnye mestorozhdeniya* [Magmatic ore deposits]. Moscow, Nedra Publ., 129-150. (In Russian)
- Zakrzewski M.A. (1977) Hegbomite from the Fe-Ti deposit of Liganga (Tansania). *Neues Jahrb. Mineral. Monatsh.*, 373-380.