

ОСОБЕННОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ГАЛОГЕННО-ГЕОХИМИЧЕСКОЙ И РУДНОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ КУСИНСКОГО Ti-V-Fe МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

© 2018 г. Т. Д. Бочарникова, В. В. Холоднов, Е. С. Шагалов

Рудные зоны в вертикальном разрезе Кусинского ильменит-магнетитового месторождения (интрузии) имеют галогенно-геохимические особенности, а также различия в составе массивных пластообразных руд. Состав галогенов во “флюидных” сосуществующих минералах (апатите, амфиболе, ставролите) из околорудных пород, а также состав руд и слагающих их минералов (ильменита, магнетита и др.) из рудных тел этих зон, зависят от положения рудных зон в разрезе интрузии. Установлена взаимосвязь составов рудообразующих минералов (уровень концентраций того или иного компонента) с количественным содержанием Cl во “флюидных” минералах, отражающих состав флюида при формировании рудной зоны на том или ином горизонте интрузии. Сделан вывод, что, возможно, снижение концентрации Cl во “флюидных” минералах из рудных зон в придонной части интрузии (месторождения) связано с интенсивным процессом скарнирования и формирования здесь минеральных копей.

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 Южного Урала связано с внедрением в уже раскристаллизованные породы остаточной богатой летучими рудной магмы [Малышев и др., 1934; Титано-магнетитовые месторождения, 1936; и др.]. Другие рассматривали руды как кумулятивные титано-магнетитовые, 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 пластообразными телами массивных магнетит-ильменитовых руд является следствием магматической дифференциации, было обосновано в работе [Штейнберг и др., 1959].

Кусинский массив с месторождением магнетит-ильменитовых руд является самым северным в цепочке массивов, слагающих полосу расслоенных габброидов, входящих в состав среднерифейского Кусинско-Копанского габбрового комплекса. На дневной поверхности Кусинский массив представляет собой пластовую интрузивную залежь, (мощность до 1000 м), вытянутую с севера на юг, падающую на юго-восток под углом 75–80°. Со стороны восточного контакта залегают гранитогнейсы Губенского массива, со стороны западного – доломиты саткинской свиты (R₁). По мнению А.А. Алексеева с соавторами [1992], с учетом геофизиче-

ских данных Кусинская интрузия представляет собой часть более глубинного крупного расслоенного плутона с юго-восточным падением.

Сам массив в пределах месторождения сложен “переслаиванием” апогабброидных амфиболитов различной основности, включающих пласты массивных магнетит-ильменитовых руд, согласных расслоенности вмещающих их габброидов и контактам интрузии. Рудные пласты простираются на расстояние до 3 км при мощности 1–3 м. Наибольшую мощность имеют рудные тела, расположенные в центральной части массива.

Основная цель исследования – изучение флюидного режима формирования рудных зон и состава руд на разных горизонтах Кусинской интрузии для получения новых данных, которые позволили бы приблизиться к пониманию механизма формирования крупных пластов массивных магнетит-ильменитовых руд в расслоенных габброидах.

Исследования выполнены в лаборатории ФХМИ Института геологии и геохимии УрО РАН. Определение химического состава минералов проводилось в полированных шлифах на электронно-зондовом микроанализаторе JXA-5 (аналитик Л.К. Воронина). Химический анализ состава пород и руд выполнен рентгенофлюоресцентным методом (аналитическая группа под руководством Н.П. Горбуновой). Определение микроэлементного состава пород и руд проводилось на масс-спектрометре Elan-9000 после кислотного растворения (аналитическая группа под руководством Д.В. Киселёвой).

Был изучен состав галогенов в сосуществующих апатите, амфиболе и ставролите из околорудных пород рудных зон, залегающих на разных горизонтах интрузии [Бочарникова и др., 2006]. Анализ показал, что в содержании Cl и F в этих ми-

нералах из рудных тел в разрезе интрузии имеются существенные различия. Наиболее обогащены хлором апатиты (до 4.1%) из околорудных пород в центральной части Кусинского месторождения. В апатитах из приконтактовых рудных зон интрузии содержание хлора существенно понижено и не превышает 2.0%. При этом в апатитах у основания интрузии хлора содержится несколько больше, чем в апатитах у ее кровли. В распределении галогенов в амфиболе и ставролите проявилась такая же закономерность. Для сравнения отметим, что в таких расслоенных интрузиях, к которым принадлежат классические расслоенные плутоны, как Стилутер и Бушвельд, максимально высокое содержание хлора в апатитах (до 7.0%) наблюдаются в самой глубокой придонной части массивов. В верхних зонах этих расслоенных плутонов содержание хлора значительно снижено, а количество фтора нарастает вверх по разрезу [Холоднов, Бушляков, 2002].

Таким образом, в распределении галогенов вверх по разрезу Кусинского расслоенного массива и месторождения нет полной аналогии с типичными классическими расслоенными плутонами, возможно, по причине несопоставимо различной мощности сравниваемых разрезов.

В Кусинском месторождении эта закономерность наблюдается лишь в интервале: центр интрузии – ее кровля, с максимальным количеством хлора в апатите, амфиболе, ставролите из центральной рудной зоны. В основании интрузии содержание хлора в этих минералах существенно снижено. В центральной части Кусинской интрузии, где рудообразующий флюид был максимально насыщен хлором и поэтому обладал мощным окислительным потенциалом, сформировались самые богатые Fe_2O_3 , Cr и V руды. Это отразилось и на составе магнетита в этих рудах.

Более восстановительные условия в рудных зонах у кровли массива также повлияли на минеральный и химический состав рудных тел, в частности на возрастание доли двухвалентного железа в составе руд и ильменита.

Составы сосуществующих магнетита, ильменита и сопутствующего им хёббомита из этих рудных зон также различны [Бочарникова и др., 2005а, б]. В частности, ильменит, магнетит и хёббомит из массивных руд центральной части массива в сравнении с этими минералами из руд краевых зон интрузии значительно богаче MgO и Cr_2O_3 . Шпинель, присутствующая только в рудах центральной части интрузии, также характеризуется повышенной магнетизальностью. В ильмените из руд краевых зон больше MnO , а хёббомите – FeO и ZnO .

При изучении состава сосуществующих ильменита и магнетита в поперечном разрезе одного конкретного рудного пласта мы получили другой тренд в распределении элементов-примесей. В ильмените от основания рудного пласта вверх к его кровле за-

кономерно уменьшается концентрация MgO , Cr_2O_3 , но возрастает содержание FeO . В магнетите вверх по разрезу увеличивается концентрация Al_2O_3 , ZnO при накоплении у основания FeO и TiO_2 . При этом магнетит из центральной части рудного пласта отличается максимальным содержанием Cr_2O_3 .

Закономерное изменение концентрации галогенов в апатите, амфиболе и ставролите из околорудных пород, а также общего химического состава массивных руд и слагающих их минералов (ильменита, магнетита, хёббомита) отражает позицию рудных залежей и околорудных пород в вертикальном разрезе Кусинского месторождения. Эти особенности в химическом составе массивных руд, а также в составах рудных и “флюидных” минералов по разрезу Кусинского месторождения схематически отображены на рис. 1. Причиной сниженной концентрации Cl в основании Кусинской интрузии в сравнении с таковой центральной части может быть присутствие в приподошвенной части интрузии крупных ксенолитов мраморизованных доломитов саткинской свиты нижнего рифея, подстилающей Кусинский массив. Под воздействием флюидов магматического расплава здесь сформировались мощные скарновые зоны, с которыми ассоциируют многочисленные минеральные копи – Ахматовская, Зеленцовская и ряд других. Они показаны на рис. 1.

Сравнительный анализ состава галогенов в апатитах из разных копей Кусинско-Копанского комплекса показал [Бочарникова и др., 2011], что апатиты Ахматовской копи, находящейся среди скарнов вблизи основания Кусинского массива (южная его часть), характеризуются относительно высоким содержанием хлора (до 0.35% Cl при содержании 0.38–0.90% F). Существенно более высокое содержание хлора имеют апатиты в скарнах Зеленцовской копи, расположенной в более северной части Кусинского массива [Шагалов и др., 2017]. Здесь количество Cl в апатитах увеличивается до 1.0–1.5% при содержании 0.4–0.6% F . Кроме того, важно отметить, что в составе апатита этой копи наблюдаются очень высокие значения содержания сульфата серы, варьирующие в диапазоне 1.5–5.5% SO_3 . Вхождение такого количества шестивалентной серы в структуру апатита вместо пентавалентного фосфора компенсируется значительным присутствием в его составе (до 4.6%) кремнезема и ванадия (до 1.4% V_2O_5). Наряду с этим в везувиан-гранат-форстерит-кальцитовом скарне этой копи обнаружен ангидрит в виде включений в форстерите. Высокое содержание хлора характерно здесь и для скаполита (до 2.44%).

Эти данные свидетельствуют о том, что в процессе образования скарнов по ксенолитам доломитов из кристаллизующегося магматического расплава в скарны мог происходить значительный привнос Cl , который вошел в состав скарнообра-

Апатит	Амфиболы, ставролит	Хегбомит	Ильменит	Магнетит	Руда	Схематичный разрез Кусинской интрузии
F	F	FeO, ZnO	TiO ₂	TiO ₂ , Al ₂ O ₃	TiO ₂ , FeO, Ni, Pb	
Cl _{max} , (H ₂ O)	Cl _{max}	Al ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃ , MgO, TiO ₂	FeO, MgO	Cr ₂ O _{3max} , MgO	Fe ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃ , MgO	
Cl(-)	Cl(-)	FeO, ZnO _{max}	Al ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃ , V ₂ O ₅ , ZnO	ZnO	Al ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃ , MgO, TiO ₂ , Fe ₂ O ₃ (-), Zn _{max}	

Рис. 1. 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 – скарированные карбонатные породы (ксенолиты); 7 – рудные тела; 8 – минеральные копии в скарнах: 1 – Зеленцовская, 2 – Ахматовская.

зующего флюида. Возможно, поэтому, учитывая значительные объемы скарнов, сам магматический расплав у основания интрузии стал беднее Cl.

Вне зон скарирования обеднение придонных частей интрузии хлором также может быть связано с мощной “промывкой” габброидов этой части интрузии углекислым флюидом. Данный флюид, сформированный в результате взаимодействия магматического расплава и рассолсодержащей карбонатной толщи [Крупенин и др., 2009; Крупенин, Гараева, 2015], по модели [Boudreau, McCallum, 1989], мог действовать по принципу “водосоляной бани”. Возможно, этот обогащенный Cl флюид мог быть дополнительным источником Cl в центральной части интрузии.

Одновременно в зону скарнообразования из вмещающих карбонатных толщ с растворами могли приноситься сульфатная сера, а также бор [Бочарникова и др., 2011], барий и полиметаллы (Zn, Pb). На это указывает присутствие барит-полиметаллического оруденения в рифейских толщах Башкирского мегантиклинория [Маслов и др., 2001]. В Кусинском месторождении это выразилось в наличии в породах и рудах сульфидов (пирита, халькопирита, пирротина, галенита и др.).

К другим результатам данного исследования можно отнести следующее.

На основе изучения распределения галогенов в апатитах двупироксенового габбро Кусинской интрузии подтвержден магматический источник хлора в составе рудообразующего флюида. Унаследованность отношений TiO_2/FeO^* в габбро-норитах, массивных магнетит-ильменитовых рудах и около-

рудных хлорит-гранат-амфиболовых ореолах Кусинского месторождения также указывает на единый магматический источник этих образований. Отношение TiO_2/FeO^* в габбро-норитах составляет 0.17–0.19, околорудных метасоматитах – 0.17–0.20, массивных магнетит-ильменитовых рудах – 0.19–0.20. В то же время в низкотитанистых габбро-анортозитовых ритмах это отношение значительно ниже – 0.08–0.12, а в габбро-норитах более глубокого, юго-восточного, блока Кусинского массива существенно выше – 0.30–0.45.

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

Каймы в габбро-норитах образованы в результате субсолидусного взаимодействия ранних породообразующих и рудных минералов с остаточными расплавом и флюидом. Это свидетельствует о неравновесности ранних минералов габбро-норитов с последними порциями расплава и отделившимся от расплава флюидом. Это подобие кайм вокруг рассеянных в габбро-норитах рудных минералов и околорудных ореолах может свидетельствовать о том, что образование массивных пластообразных руд на Кусинском месторождении могло происходить в результате сегрегации ильменита и титаномагнетита в позднемагматическую стадию в присутствии остаточного расплава и флюида, существенно обогащенного хлором.

Новые данные свидетельствуют и о том, что только под воздействием высококонцентрированного, богатого хлором, флюида, происходят перераспределение и сегрегация рудного вещества, ранее находившегося в расплаве и породах в относительно неравномерно-рассеянном состоянии, с последующим формированием рудных слоев, прослоев, а затем и более крупных рудных масс. Этот же богатый хлором флюид определил и околорудные преобразования пород, их кислотное выщелачивание с образованием нетипичных для габброидных пород таких высокоглиноземистых минералов, как ставролит, корунд, кианит, хёгбомит и др.

Работа выполнена в рамках темы № АААА-А18-118052590034-0 государственного задания ИГГ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев А.А., Алексеева Г.В., Ковалев С.Г. Кусинско-Копанский расслоенный комплекс: новые данные, представления и перспективы. Уфа: ИГГ УрО РАН, 1992. 20 с.
- Бочарникова Т.Д., Прибавкин С.В., Холоднов В.В., Воронина Л.К. Хёгбомит из ильменит-магнетитовых руд Кусинского массива (Южный Урал) // Зап. Всерос. минерал. о-ва. 2005а. № 2. С. 84–90.
- Бочарникова Т.Д., Холоднов В.В., Воронина Л.К. Закономерное изменение состава ильменита и магнетита из рудных залежей в разрезе Кусинского габбрового массива // Ежегодник -2004. Тр. ИГГ УрО РАН. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2005б. С. 313–317.
- Бочарникова Т.Д., Холоднов В.В., Воронина Л.К. Особенности распределения галогенов в сосуществующих апатите, амфиболе и ставролите из рудных зон Кусинской интрузии // Ежегодник-2005. Тр. ИГГ УрО РАН. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2006. С. 143–146.
- Бочарникова Т.Д., Холоднов В.В., Шагалов Е.С. Состав и источники флюидов в скарнах минеральных копей кусинско-копанского интрузивного комплекса (Южный Урал) // Литосфера. 2011. № 5. С. 124–130.
- Крупенин М.Т., Гараева А.А. Источники флюидов для метасоматических магнетитов Исмакаевского месторождения Южно-Уральской провинции (термокриометрия флюидных включений) // Литосфера. 2015. № 2. С. 133–139.
- Крупенин М.Т., Прохаска В., Маслов А.В. Cl-Br-Na систематика флюидных включений в магнетитах Южно-Уральской провинции // Докл. РАН. 2009. Т. 426, № 3. С. 351–354.
- Малышев И.И., Пантелеев П.Г., Пэк А.В. Титаномагнетитовые месторождения Урала. Л.: АН СССР, 1934. 272 с.
- Маслов А.В., Крупенин М.Т., Гареев Э.З., Анфимов Л.В. Рифей западного склона Южного Урала (классические разрезы, седименто- и литогенез, геологические памятники природы). Т. I. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2001. 351 с.
- Мясников В.С. Некоторые особенности месторождений титаномагнетитовых руд Южного Урала и проявления в них метаморфизма // Геология рудных месторождений. 1959. № 2. С. 49–62.
- Титаномагнетитовые месторождения Урала: сб. ст. под ред. П.И. Лебедева. М.; Л.: АН СССР, 1936. 176 с.
- Феритатер Г.Б., Холоднов В.В., Бородин Н.С., Условия формирования и генезис рифейских ильменит-титаномагнетитовых месторождений Урала // Геология рудных месторождений. 2001. Т. 43, № 2. С. 112–128.
- Феритатер Г.Б., Холоднов В.В., Прибавкин С.В., Бородин Н.С., Бочарникова Т.Д. Рифтогенный магматизм и оруденение Южного Урала // Геология рудных месторождений. 2005. Т. 47, № 5. С. 421–443.
- Холоднов В.В., Бушляков И.Н. Галогены в эндогенном рудообразовании. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 395 с.
- Шагалов Е.С., Сустанов С.Г., Холоднов В.В. Высокохлорные и сульфатные ассоциации минералов в породах кусинско-копанского комплекса // XXIII Всерос. науч. конф. “Уральская минералогическая школа – 2017”, посвящ. 120-летию со дня рождения академика А.Г. Бетехтина: сб. ст. студентов, аспирантов, научных сотрудников академических институтов и преподавателей вузов геологического профиля. Екатеринбург: Альфа Принт, 2017. С. 233–237.
- Штейнберг Д.С., Кравцова Л.И., Варлаков А.С. Основные черты геологического строения Кусинской габбровой интрузии и залегающих в ней рудных месторождений // Тр. Горно-геол. ин-та. 1959. № 40. С. 13–40.
- Boudreau A.E., McCallum I.S. Investigations of the Stillwater Complex. Pt V. Apatites as indicators of evolving fluid composition // Contrib. Mineral. Petrol. 1989. V. 102. P. 138–153.