

**КУСИНСКО-КОПАНСКИЙ ИНТРУЗИВНЫЙ КОМПЛЕКС (ЮЖНЫЙ УРАЛ):
МИНЕРАЛОГИЯ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ МАГНЕТИТ- ИЛЬМЕНитОВЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Холоднов В.В. (holodnov@igg.uran.ru), Прибавкин С.В., Бочарникова Т.Д.
Уральское отделение. Институт геологии и геохимии УрО РАН

**KUSA-KOPAN INTRUSIVE COMPLEX (SOUTH URAL): MAGNETITE-ILMENITE
DEPOSIT MINERALOGY AND FORMATION CONDITIONS**

Holodnov V.V., Pribavkin S.V., Bocharnikova T.D.
Urals branch. Institute of Geology and Geochemistry UB RAS

Процессы рифтогенеза играли ведущую роль в магматической предыстории Урала и в металлогении этого периода. В рифей-раннепалеозойское время на западном склоне Урала они представляли собой этапы деструкции краевой части Восточно-Европейской платформы (ВЕП). В начале среднего рифея в Башкирском мегантиклинории Южного Урала в связи с новой более активной фазой рифейского рифтогенеза (кувашский грабен) произошло формирование расслоенного кусинско-копанского габбро-гранитного комплекса и сопровождающих его крупных магнетит-ильменитовых и титаномагнетитовых месторождений.

Дифференцированные интрузии габброидов (Маткальский, Копанский, Медведевский и Кусинский массивы) и гранитоидов (Рябиновский и Губенский массивы) этого комплекса, в виде длинной (около 70 км) субмеридиональной цепочки массивов, тяготеют к крупному Зюраткульскому разлому, который представляет собой древнюю мобильную (шовную) структуру, разделяющую гетерогенные блоки ВЕП. Время внедрения рудоносных габбровых интрузий кусинско-копанского комплекса различными изотопными методами (Sm-Nd, U-Pb, Rb-Sr) датируется сходящимися значениями возраста 1385-1400 млн. лет (Холоднов и др., 2006). Все габброиды кусинско-копанского комплекса обогащены Ti, а также Fe, V и другими элементами группы железа. Они, как и их гранитоидные дифференциаты, представленные Рябиновским и Губенским массивами, выделяются высокими концентрациями высокозарядных редких элементов (Nb, Ta, Zr, Hf, Y, Yb и др.) индикаторных для внутриплитного магматизма. Отрицательные значения ϵ_{Nd} для габбро-норитов (-2,4) и массивных магнетит-ильменитовых руд пластообразных залежей (-1,1) Кусинского месторождения и первичное отношение изотопов Sr для габбро-норитов и гранитов Рябиновского и Губенского массивов (0,7052) свидетельствуют о практически недеплетированном мантийном источнике и о некотором мантийно-коровом взаимодействии.

Фашии глубинности, режим флюидов как факторы, определяющие особенности минерального состава, условий формирования массивов и месторождений кусинско-копанской группы и масштабы Fe-Ti оруденения

Характерной особенностью кусинско-копанской группы интрузий и месторождений является их формирование в условиях меняющихся с юга на север, т.е. в субмеридиональном направлении - фашиях глубинности (Ферштатер и др., 2001): от малоуглубинных гипабиссальных на юге (Копанский и Маткальский габбровые массивы и ассоциированные с ними месторождения, Рябиновский гранитный массив) до углубинной абиссальной на севере (Кусинский габбровый и Губенский гранитный массивы, Кусинское месторождение), с углубиной погружения кристаллического фундамента на севере кувашского грабена до 20 км. Эволюция в режиме флюидов (воды и галогенов) при формировании габброидов и оруденения происходит синхронно с ростом углубины формирования месторождений - от сухого фтороносного режима флюидов на юге до водного хлороносного на севере.

Характерной особенностью рифтогенных месторождений этой группы является их преимущественная специализация на ильменитовые руды, где ильменит кристаллизуется в парагенезисе с титаномагнетитами, различающимися по содержанию титана, ванадия и хрома. Соответственно с падением температуры и ростом углубинности месторождений с юга на север в составе рудного титаномагнетита последовательно снижаются содержания титана (Копанское мест. - 15 мас.% TiO₂, Медведевское мест. - 10 мас.% и менее, Кусинское мест. - 1-6 мас.%) и растет содержание ванадия (от 0,5 до 1,5 мас.%) и хрома (от 0,1 до 2,5 мас.%). В ильмените повышается

содержание магния (от 0,7 до 1,4%) и гематитового минала, отражающего более высокое значение фугитивности кислорода на севере, фиксируемое и составами силикатных минералов, в апатите нарастают содержания хлора (от 0,3 до 2 мас.% и более). Петрологические и изотопно-геохимические данные, таким образом, свидетельствуют, что Кусинский массив, как и вся Кусинско-Копанская интрузия - это серия разноглубинных (по обособлению) рудоносных расплавов, формирующихся на фоне уменьшения глубины их обособления и снижения общего и водного давления. Такая эволюция приводит к преимущественному накоплению в менее глубинных месторождениях титана и к росту TiO_2/Fe_2O_3+FeO отношения. Различие в глубине обособления рудоносных магм проявляется и в особенностях геохимической специализации массивов и месторождений. При более глубинной позиции месторождений, в породах и рудах увеличиваются концентрации V, Cr, Ni, Co, Cu, в апатите - количество хлора, при менее глубинной выше содержания Ti, Th, Sr, легких РЗЭ, Nb, фосфора и фтора. Формирование глубинных месторождений происходит в более окислительных условиях, при взаимодействии рудоносного расплава с глубинным хлороносным флюидом, обогащенным хромом, никелем и медью.

Высокое содержание титана (10-15% TiO_2) в титаномагнетитах малоглубинных месторождений южной группы (Копанское и Маткальское), наличие значительного количества ильменита в породах и рудах во многом определяется низким окислительным потенциалом расплавов и бедностью их водой (сухостью). Дефицитом воды, кислорода и хлора в рудообразующем расплаве при повышенной активности фтора обусловлены и высокие температуры (более 1000°C) образования руд малоглубинных южных месторождений. Постмагматическая эволюция таких серий происходила быстро (при быстром охлаждении) и при дефиците постмагматических флюидов, что способствовало сохранности первичного высокотитанистого магматического титаномагнетита и высокожелезистых бедных глиноземом темноцветных минералов, слабому проявлению здесь постмагматических гидротермально-метасоматических процессов. Такие малоглубинные и высокотемпературные рудообразующие системы, как показывает пример южных месторождений кусинско-копанского комплекса, наиболее благоприятны для формирования крупного высокотитанистого титаномагнетит-ильменитового и существенно ильменитового оруденения.

При формировании глубинного Кусинского месторождения флюидное давление возрастало, приближаясь к литостатическому, определяемому глубиной нахождения рудно-магматических масс. Для этого глубинного месторождения характерно наличие в расплавах и флюидах повышенных содержаний воды и хлора, высокий потенциал кислорода близкий к буферу магнетит-гематит. Это понижало температуру формирования титаномагнетитовых руд до 700-800°C и ниже, при существенном снижении в титаномагнетите содержаний титана (до 6% и ниже), с ростом доли трехвалентного железа и количества хрома, снижению в породах и рудах железистости темноцветных минералов и росту их глиноземистости. Для такого флюидного типа рудно-магматических систем характерно более широкое проявление постмагматических гидротермально-метасоматических процессов с участием хлорсодержащих растворов, чем обусловлено появление скарнов с разнообразной камнесамоцветной минералогией (знаменитая Ахматовская копь и др.), формирование богатых сегрегационных пластообразных руд.

Важным критерием, характеризующим фациальный тип месторождений кусинско-копанского комплекса, является величина отношения титана к сумме железа в породах и рудах. В малоглубинном типе эта величина существенно выше (до 0,33), определяя собственно преобладание ильменитовых руд над титаномагнетитовыми или кристаллизацию богатого титаном титаномагнетита. В глубинном кусинском типе она ниже (0,10-0,07), что способствует кристаллизации менее титанистых магнетитов в парагенезисе с ильменитом, обогащенным магнием. Показателен разрез железорудных зон в расслоенных интрузиях (Стилуотер, Скергаард, Бушвелд и др.), где вверх по разрезу растет количество титана в титаномагнетите при спаде ванадия, отражая влияние вертикальной фациальной зональности. В малоглубинных месторождениях южной группы (Копанском и Маткальском) на примере отдельных рудных зон также фиксируется роль вертикальной фациальной зональности в эволюции состава титаномагнетит-ильменитового оруденения: титаномагнетитовые руды формируются в нижней части рудоносных зон, среди более меланократового габбро с пониженным Ti/Fe отношением, а ильменитовые - в верхней их части в более лейкократовом габбро, где существенно выше отношения титана к сумме железа, резко увеличивается количество фосфора и апатита, а в последнем нарастает содержание фтора.

Фациальные условия глубинности и флюидный режим контролируют также этап, на котором происходит окончательное формирование и обособление рудного расплава. Формирование

обогащенного рудным веществом расплава происходит (Маракушев, Безмен, 1992) в результате его отщепления от силикатного расплава, предварительно прошедшего ферробазальтовый тренд магматической дифференциации и обогащенного вследствие этого железом, титаном, фосфором и летучими. Эта стадия обособления может быть определена по характеру соотношения содержаний MgO и суммы оксидов железа и титана в породах и рудах. Для малоглубинных месторождений отделение остаточного рудного расплава от силикатного происходит на более позднем этапе эволюции рудно-магматических систем, при менее магнезиальном его составе, соответственно с более высоким содержанием в рудном расплаве железа и титана и ростом Ti/Fe отношения. Малоглубинные месторождения южной группы поэтому имеют низкое содержание в рудах MgO (6-7%). Формирование рудных расплавов в глубинном типе месторождений происходит значительно раньше и на более значительной глубине. Такие условия не благоприятствуют длительной дифференциации магм, соответственно руды здесь имеют высокие концентрации MgO, но характеризуются пониженным Ti/Fe отношением. Для Кусинского месторождения отделение рудного расплава от силикатного происходит при 9% MgO.

В глубинном Кусинском месторождении наряду с кумуляцией рудных минералов важным петро-рудогенерирующим процессом является сегрегация рудного вещества флюидом с образованием крупных пластообразных залежей сплошных (массивных) руд, многократно чередующихся по разрезу с вкрапленными кумулятивными рудами и безрудными породами. Наличие высоких содержаний хлора в рудообразующем флюиде явилось здесь одним из определяющих факторов образования крупных сегрегационных рудных залежей этого месторождения. Сходство минерального состава кайм внутри практически не метаморфизованного рудного габбро-норита и околорудных зон вокруг пластообразных залежей сплошных руд на Кусинском месторождении свидетельствует о едином механизме их образования. Образование массивных руд в Кусинском месторождении происходило в результате сегрегации ильменита и титаномагнетита из рудных габброидов в позднемагматическую стадию в присутствии остаточного флюида существенно водно-хлоридного состава.

Образование пластообразных (жильных) руд Кусинского месторождения связано с некоторым перемещением обогащенного рудного вещества в тектонически ослабленные зоны массива. Возможно, что такое перемещение происходило из более глубоких горизонтов массива, что определяет наличие в рудах повышенных содержаний хрома, никеля, кобальта, меди, а также особый минеральный состав руд, отличный от менее глубинных месторождений, с наличием в рудах таких специфических минералов как хегбомит, эсколаит, обогащенного хромом и цинком хлорита, хромсодержащего магнетита. На Кусинском месторождении, как на то указывает морфология самих рудных тел, в условиях высокого общего и флюидного давления рудное вещество отжималось в полости отслоения согласные с общей стратификацией массива, с образованием пластообразных рудных залежей, закономерно распределенных по вертикали, с некоторой эволюцией их минерального состава (зональностью) в вертикальной плоскости. Ранее этот тип оруденения представлял промышленный интерес и был в существенной степени отработан. Более поздний, чем сам массив внедренный характер этих руд, хорошо согласуется с геологическими и петрологическими данными. Это более массивные образования по отношению к вмещающим их породам, которые сильно разгнейсованы. Более позднее время образования пластообразных рудных залежей подтверждено изотопными данными. Sm-Nd методом возраст их формирования датирован значением 1363 ± 78 млн. лет. Эти исследования проведены совместно с Ю.Л. Ронкиным и О.П. Лепихиной.

Характеристика особенностей состава и строения пластообразных рудных залежей в зависимости от их позиции в вертикальном сечении Кусинского месторождения

В последние годы проведено детальное изучение минералогии пластообразных залежей сплошных (массивных) руд и околорудных пород в зависимости от их позиции в вертикальном сечении месторождения. Такие залежи относительно равномерно распределены по всей обнаженной части месторождения, но наиболее развиты в виде серии сближенных тел в центральной части, которая представляет в настоящее время круто наклоненную на восток (до 85 градусов) структуру. В этой структуре (тектоническом блоке) все граничные поверхности, в том числе и пластообразные рудные залежи и окаймляющие их контактово-реакционные зоны, также сильно наклонены на восток. Поэтому массивные руды Кусинского месторождения, залегающие в центральной его части - это крутопадающие, практически вертикальные пластообразные залежи, которые простираются на расстояние в субмеридиональном направлении до 3 км при мощности рудных тел до 3 м и более.

Проведено изучение распределения Cl и F в апатите, амфиболе и ставролите из околорудных метасоматитов, сформированных вокруг пластообразных рудных залежей, расположенных на разных гипсометрических уровнях Кусинской интрузии (Бочарникова и др., 2006). Установлено, что максимальными концентрациями Cl (до 3%) характеризуются апатиты околорудных пород из рудных залежей в центральной части интрузии. Распределение F имеет иную закономерность. Максимальные его концентрации (до 1,2%) характерны для апатитов из восточной прикровлевой рудной зоны. Это объясняется геохимической особенностью F к концентрированию в верхних частях флюидно-магматических систем. Распределение Cl в амфиболах и ставролитах обнаруживает близкую закономерность. Амфиболы и ставролиты центральной рудной зоны наиболее богаты Cl (0,30-0,38%, против 0,07-0,14% в краевых зонах). С выявленной зональностью галогенов коррелируется состав рудообразующих минералов (магнетита и ильменита), а также хегбомита и шпинели. В центральной рудной зоне богатой хлором в составе этих минералов увеличиваются содержания Mg и Cr, хегбомит имеет пониженную железистость, шпинель обогащена цинком. В прикровлевой рудной зоне, обогащенной фтором, в магнетите, ильмените и хегбомите возрастает содержание Ti, в хегбомите резко увеличивается содержание Zn и растет железистость. В рудной зоне у подошвы интрузии во всех рудных минералах существенно возрастают содержания Zn, в ильмените увеличивается также количество Al, V, Mn, Fe²⁺.

На всех гипсометрических уровнях в рудных зонах апатиты подрудных метасоматитов в сравнении с надрудными имеют более высокие содержания Cl, а надрудные обогащаются F. Одновременно с этим меняется состав рудных минералов по разрезу пластообразных рудных залежей. Ильмениты в основании рудных пластов обогащены Mg, Cr, Al, а магнетиты Mg, Fe²⁺, Ti. В магнетитах из верхней части рудных пластов выше содержания Cr, Al, Zn. Изменение Cr и Al в этих минералах происходит в противофазе друг другу, а сам характер минералого-геохимической зональности в этом случае несколько иной, чем в целом по разрезу интрузии.

Охарактеризованные выше данные по минералогической зональности отражают неравновесность условий формирования пластообразных рудных тел Кусинского месторождения, с меняющимся по разрезу месторождения и по разрезам отдельных рудных тел (зон) режимом кислорода и флюидов (галогенов), а также градиентом температур, возникающим при их формировании в различных частях рудоносной интрузии - в ее краевых зонах и в центральной части, где накапливался наиболее богатый хлором рудообразующий флюид. Это и обусловило более высокую интенсивность рудообразующего процесса в центральной части Кусинской интрузии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант 07-05-96006-р-Урал-а, Президентской программы поддержки научных школ НШ-4210.2006.5, а также программ Президиума РАН и Отделения наук о Земле РАН (проекты 6, 7 и др.).

Список литературы

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 Института геологии и геохимии УрО РАН. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2006. С.143-146.

Маракушев А.А., Безмен Н.И. Минералого-петрологические критерии рудоносности изверженных пород. М.: Наука, 1992. 316 с.

Ферштатер 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.

Холоднов В.В., Ронкин Ю.Л., Ферштатер Г.Б., Прибавкин С.В., Бородин Н.С., Лепихина О.П., Попова О.Ю. Новые Sm-Nd изотопные данные о возрасте Кусинского габбрового массива (Южный Урал) // Ежегодник-2005 Института геологии и геохимии УрО РАН. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2006. С. 331-334.