КРУПНЫЕ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫЕ, ИЛЬМЕНИТОВЫЕ И СКАРНОВО-МАГНЕТИТОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ В РИФТОГЕННЫХ СТРУКТУРАХ ЮЖНОГО УРАЛА: ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ИХ МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ, МАСШТАБЫ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ

В.В. Холоднов

Формирование и размещение крупных рудных месторождений является результатом сочетания многих факторов, к наиболее важным из которых можно отнести их связь с длительно развивающимися палеорифтовыми зонами и с порождающими их мантийными плюмами, крупные размеры рудоносных интрузий, их исключительно высокую степень дифференцированности и др. [Рундквист, Кравченко,1996; Осокин и др., 2000, и др.].

При формировании и размещении крупных месторождений титана и железа в составе двух исследованных рифтогенных структур Южного Урала – среднерифейской континентальной Кувашско-Машакской (западный склон Урала) и раннекаменноугольной надсубдукционной Магнитогорской – эти общие факторы также имеют важное значение. Магматические породы этих структур (габброиды и гранитоиды) обладают целым рядом общих петрологических, геохимических и других признаков, свойственных рифтогенным образованиям. Вместе с тем, в связи с особенностями геодинамических обстановок и истории их формирования меняются P-T параметры становления пород на магматической и постмагматической стадиях, флюидный (соотношение воды и галогенов) и окислительно-восстановительный режимы. Это оказывает существенное влияние на состав и масштабы проявления магматического титаномагнетит-ильменитового и позднего метасоматического магнетитового оруденения. В Кувашско-Машакской рифтогенной структуре развито наиболее крупное и разнообразное по составу и генезису кумулятивное (Копанский, Маткальский и Медведевский массивы) и позднемагматическое сегрегационное (Кусинское месторождение) ильменитовое и титаномагнетитовое оруденение. В Магнитогорской структуре в габброидах при наличии титаномагнетитовой отсутствует ильменитовая минерализация, а скарново-магнетитовое оруденение по масштабам резко преобладает (Магнитогорское, Малый Куйбас и др. месторождения).

На основании значимости таких признаков выделены следующие три группы факторов (критериев), определяющих минеральный состав, масштабы и условия формирования крупных титаномагнетитовых, ильменитовых и скарново-магнетитовых месторождений в рифтогенных структурах Южного Урала.

Особенности состава рифтогенных интрузий Южного Урала, формирующих крупные месторождения железа и титана

1) Первичная обогащенность магматических пород железом и титаном, высокозарядными литофильными редкими элементами (Nb,

Ta, Zr, Hf, Y, Yb, P и др.) – индикаторными для внутриплитного плюмового магматизма.

2) Низкое содержание в габброидах (континентальный Кувашско-Машакский рифт) SiO_2 (40-47 %) и высокая при таком низком содержании кремнезема концентрация щелочей

(2-3 % Na_2O и 0,2-0,5 % K_2O), что является признаком генерации расплавов при высоком давлении [Полтавец, Холоднов, 1990].

3) Высокое TiO_2/Fe_2O_3 + FeO отношение: в габброидах с ильменитовым оруденением (кусинско-копанский комплекс) оно максимально (0,17-0,33); в габбро-гранитных массивах, сопровождаемых крупным метасоматическим магнетитовым оруденением (магнитогорский комплекс), оно снижается до 0,13; в нерудоносных породах (островодужные, окраинно-континентальные и др. серии) – не превышает 0,10.

4) Низкое значение (0,3-0,5) отношения Mg/Fe + Mg габброидов рассматриваемых массивов. Этот фактор, а также вышеперечисленные особенности позволяют сделать вывод [Ферштатер и др., 2001, 2005], что на уровне современного эрозионного среза массивы сложены не продуктами кристаллизации исходных расплавов, а их обогащенными железом и титаном дифференциатами.

Условия формирования крупных месторождений железа и титана в рифтогенных структурах Южного Урала

1) Принадлежность рудоносных магматических серий к вулкано-плутоническому типу и завершающий интрузивный магматизм контрастный габбро-гранитный характер дифференциации. В Кувашско-Машакском рифте вулканические члены этой ассоциации – это базальты и риолиты машакской серии, а плутонические (кувашский грабен) – габброиды расслоенных массивов кусинско-копанского комплекса и перекрывающие их с востока граниты Рябиновского и Губенского массивов. В Магнитогорском рифте эта ассоциация представлена раннекаменноугольными базальт-риолитовыми вулканитами и комагматичными габбро-гранитными интрузивами магнитогорской серии.

2) Связь крупных магматогенных месторождений железа и титана с расслоенными массивами, с локализацией крупного кумулятивного и позднемагматического сегрегационного титаномагнетит-ильменитового оруденения в габброидах (кусинско-копанский комплекс, мест. Малый Куйбас в магнитогорском рифте), а крупного метасоматического магнетитового – в контактах более поздних габбро-гранитных массивов с карбонатными и вулканогенными толщами (магнитогорский комплекс).

3) Благоприятные тектонические условия, определяющие длительную эволюцию расплавов в различных по глубинности промежуточных магматических камерах, длительность формирования самих рудоносных интрузий и связанных с ними месторождений. В глубинных промежуточных камерах при высоких давлениях в результате процессов кристаллизационной дифференциации с фракционированием оливина, орто- и клинопироксена (возможно и граната) происходило формирование дифференцированных базитовых магм, богатых рудным веществом. Последующие неоднократные интрузии таких рудоносных магм в вышележащие горизонты земной коры определили формирование рудоносных массивов кусинско-копанского и магнитогорского комплексов, многоэтапность и многоярусность в локализации оруденения. Ранее полистадийность при формировании месторождений магнетита Среднего и Северного Урала была отмечена Л.Н. Овчинниковым [1960]. Крупные размеры рифтогенных массивов и промежуточных камер отражают крупные объемы исходных магматических расплавов, а длительность эпох тектонического покоя обусловлавливает длительность кристаллизации. Этими факторами определяется интенсивность кристаллизационной дифференциации магм, исключительная степень накоплениям рудных металлов в поздних расплавах и флюидах.

4) Зависимость состава и масштабов оруденения от глубины формирования массивов и месторождений. Эта зависимость характерна как для магматических месторождений железа и титана, так и для метасоматических магнетитовых. В первом случае (Кувашско-Машакский рифт) наблюдается существенный рост масштабов титаномагнетитовой и особенно ильменитовой минерализации от более глубинного и небольшого по масштабам северного Кусинского массива (с запасами руд около 130 млн т), формирующегося, по петрологическим данным, на глубине около 20 км, к малоглубинным, с глубиной становления 3-5 км, южным массивам (Маткальскому и Копанскому). Прогнозные ресурсы всех типов руд южных массивов составляют около 6 млрд т, при среднем

содержании Fe 20 % и TiO_2 6 % [Фоминых и др., 1985]. Для метасоматических магнетитовых месторождений Урала и С. Казахстана также характерен рост их масштабов в связи с уменьшением глубины формирования [Полтавец и др., 1990]. Образование наиболее крупных месторождений отвечает субвулканическому уровню. К месторождениям этого уровня глубинности относятся все наиболее крупные месторождения Валерьяновской зоны Тургая (Качарское, Петровское, Глубоченское, Соколовско-Сарбайское и др.). На Урале месторождения этого уровня отсутствуют из-за глубокого эрозионного среза. Здесь сохраняются месторождения, отвечающие более глубокому гипабиссальному или гип-, мезоабиссальному уровню (Магнитогорское, месторождения Тагильской зоны). Для этого типа наиболее применимо понятие контактово-метасоматические месторождения.

5) Крупные месторождения магнетитов метасоматического генезиса характеризуются более высокими грави- и магнитными аномалиями, отражающими интенсивность развития на глубине продуктов базальтоидного магматизма, для них установлена также связь с крупными кольцевыми структурами, с локализацией наиболее крупных месторождений в их центральных частях, а мелкие удалены к периферии [Полтавец и др., 1990].

Факторы (режим флюидов и др.), определяющие особенности минерального состава месторождений, соотношение в рудно-магматических системах магматического и метасоматического оруденения.

Эта группа факторов тесно связана с особенностями геодинамических обстановок формирования рудно-магматических систем, определяемых этими обстановками различий в составе и режиме флюидов, водонасыщенности магм, в интенсивности флюидно-магматического взаимодействия. В зонах надсубдукционного рифтогенеза магмы более богаты водой и хлором. Исходное содержание воды в надсубдукционных базитовых магмах достигает 3 % и возрастает в процессе их эволюции [Ферштатер, Беа, 1993]. В континентальных рифтах базитовые расплавы имеют, в основном, пониженную водонасыщенность при значительно более высоких содержаниях углекислоты и фтора [Коваленко и др., 2002 и др.]. Показателем высоких концентраций хлора в надсубдукционных расплавах является высокое содержание этого элемента в апатите (до 2-2,5 %) из габброидов и гранитоидов [Холоднов, Бушляков, 2002]. Коэффициент распределения Cl между апатитом и силикатами (амфиболом) в высокопродуктивных надсубдукционных сериях также максимален (до 20 и более). Окисление первичной железистой роговой обманки в условиях магнетитовой феррофации [Ферштатер,и др., 1978], характерное для таких условий, приводит к превращению ее в низкожелезистую вторичную разновидность и к массовому образованию низкотитанистого магнетита. В надсубдукционных рудно-магматических системах, таким образом, появляется другой источник рудного железа – это непосредственно породы самих интрузий.

Интенсивность выноса железа из пород в результате процессов флюидно-магматического взаимодействия коррелируется с масштабами магнетитовой минерализации и сопровождается заметным снижением содержаний железа в породах высокопродуктивных серий [Полтавец и др., 1990]. Участие хлора в выносе железа из интрузивов подтверждает хорошо выраженная корреляция между количеством хлора в апатитах из интрузивных пород (габбро-диориты) и масштабами скарново-магнетитовых месторождений [Бушляков, Холоднов, 1986]. Содержания Cl в скаполитах на месторождениях Валерьяновской зоны Тургая также коррелируются с масштабами оруденения [Полтавец и др., 1990]. Такая корреляция – не только важный критерий связи оруденения с интрузивным магматизмом, но и доказательство накопления и переноса железа флюидом, обогащенным хлором. Из наличия этой корреляции вытекает и возможность количественного прогнозирования метасоматического магнетитового оруденения. Экспериментальные исследования подтверждают [Пуртов и др., 2002, и др.], что именно кислые гидротермальные растворы с высокими содержаниями Cl являются наиболее благоприятной средой для массовой экстракции железа из пород и расплавов и его переноса в область рудоотложения.

Основными источниками воды и хлора в надсубдукционной зоне могли служить процессы дегидратации в субдуцируемом слэбе и гидратированный мантийный клин. Эти летучие взаимодействовали с подсубдукционными внутриплитными мантийными магмами, обогащенными рудными металлами (Fe, Ti), галогенами, высокозарядными редкими элементами (Nb, Zr и др.). Модель такой рудно-магматической си-

стемы представлена на рис. 1. Зона подъема магм внутриплитного типа в надсубдукционной области образуется при отрыве и опускании в мантию более тяжелой океанической плиты [Авдейко, Палуева, 2003, и др.]. Такая модель хорошо согласуется с представлениями [Мосейчук, Сурин, 2005] о формировании скарново-магнетитовых руд Магнитогорского рудного поля на деструктивном этапе развития зрелой раннедевонско-раннекаменноугольной островной дуги, в ее тылу, вследствие подъема мантийного диапира в активизированном надсубдукционном мантийном клине.

Надсубдукционная позиция рифта оказывала существенное влияние и на геохимическую специализацию подсубдукционных внутриплитных магм. В габброидах магнитогорской серии повышаются содержания щелочей (K, Na), а также Al, Rb, Sr ,V на фоне снижения, в сравнении с континентальными кувашско-машакскими породами, содержаний Fe и высокозарядных элементов – Nb, Zr, Ti, P,а также отношений K/Rb, Nb/Ta. Магнитогорские гранитоиды, по сравнению с гранитоидами Кувашско-Машакского рифта, обеднены Nb, Ta, Zr, Hf, Ba и имеют более низкое La/Yb отношение. Как и в габброидах, здесь выше содержания Al, Na, Rb, V, а также Ca, Sr, Cr, Co, Ni, Th, U. Обогащение пород LILE и Sr указывает на значительную долю в этих породах субдукционной компоненты. Кроме того, магнитогорские гранитоиды отличаются ярко выраженной специализацией на Mo и Pb.

Формирование континентального Кувашско-Машакского рифта обязано не субдукции, а первичным раздвигам, предшествующих заложению Уральского палеоокеана. В породах кусинско-копанского комплекса, в связи с его относительной маловодностью, сохранились первичные парагенезисы железо-магнезиальных силикатов и железо-титановых оксидов. Наиболее чувствительный к окислению в интрузивных породах породообразующий силикат, – роговая обманка – имеет здесь существенно более высокую железистость, чем в породах магнитогорской серии. Эти данные однозначно указывают на то, что породы не претерпели поздне- и постмагматических преобразований в условиях магнетитовой феррофации и объясняют отсутствие масштабного скарново-магнетитового оруденения в связи с габброидами и гранитоидами этого рифтогенного комплекса.

Изложенные выше данные, таким образом, свидетельствуют, что исходным химическим составом рифтогенных расплавов, а именно, богатством их железом и титаном, были созданы предпосылки для формирования пород, обогащенных этими элементами, и, следовательно, для образования крупного магматогенного титаномагнетитового и ильменитового, а также более позднего, постмагматического гидротермально-метасоматического магнетитового оруденения.

Вместе с тем, особенности глубинного строения и геологического развития, различные условия кристаллизации магматических расплавов и их постмагматической эволюции, свя-

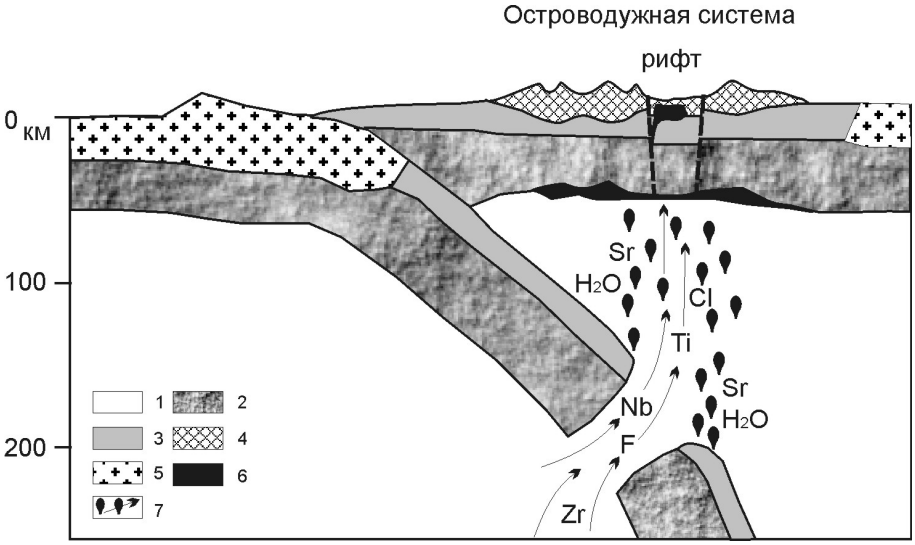

Рис. 1. Модель процессов магмообразования и флюидно-магматического взаимодействия в надсубдукционных рифтовых системах с крупным гидротермально-метасоматическим магнетитовым оруденением (Магнитогорский рифт).

1 – астеносфера, 2 – литосфера, 3 – океаническая кора, 4 – островодужная система, 5 – континентальная кора, 6 – зоны магмообразования, пути перемещения и взаимодействия магм и флюидов в мантийном клине, 7 – зона подъема магм внутриплитного типа, обогащенных Ti, Fe, Nb, Zr, Y и др. высокозарядными элементами. Черным пятном в рифте показана позиция Магнитогорского массива и месторождения.

занные с разными геодинамическими условиями (различная водонасыщенность магм, различный режим галогенов и др.), ответственны за различия в составе и масштабах железо-титанового оруденения сравниваемых рифтогенных структур Южного Урала.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 05-05-64079 и 04-05-96052-р2004 Урал-а) и гранта НШ85.2003.5, ОНЗ (проект 7).

Список литературы

Авдейко Г.П., Палуева А.А. Геодинамические условия магмообразования Курило-Камчатской островодужной системы // Вулканизм и геодинамика: Мат-лы II Всерос. симпоз. по вулканологии и палеовулканологии. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2003. С. 164-169.

Бушляков И.Н., Холоднов В.В. Галогены в петрогенезисе и рудоносности гранитоидов. М.: Наука, 1986.109 с.

Коваленко В.И., Наумов В.Б., Ярмолюк В.В., Дорофеева В.А., Мигдисов А.А. Баланс воды и хлора между мантией и внешними оболочками Земли // Геохимия. 2002. № 10. С. 1041-1071

Мосейчук В.М., Сурин Т.Н. Факторы и параметры формирования скарново-магнетитовых залежей Магнитогорского рудного поля // Скарны, их генезис и рудоносность (Fe, Cu, Au, W, Sn…). Мат-лы науч. конф. XI чтения А.Н. Заварицкого. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2005. С.60-65.

Овчинников Л.Н. Контактово-метасоматические месторождения Среднего и Северного Урала Свердловск: УфАН СССР, 1960. 495 с.

Осокин Е.Д., Алтухов Е.Н., Кравченко С.М. Критерии выделения, особенности формирования и локализации гигантских месторождений редких металлов // Геология рудных месторождений. 2000. Т. 42. № 4. С. 389-396.

Полтавец З.И., Полтавец Ю.А., Холоднов В.В. Поисково-прогнозные критерии скарново-магнетитового оруденения. Свердловск, 1990. 66 с.

Пуртов В.К., Анфилогов В.Н., Егорова Н.Г. Взаимодействие базальта с хлоридными растворами и механизм образования кислых расплавов // Геохимия. 2002. № 10. С. 1084-1097.

Рундквист Д.В., Кравченко С.М. Промышленные суперконцентрации металлов в литосфере // Геология рудных месторождений.1996. Т. 38. № 3. С. 298-303.

Ферштатер Г.Б., Бородина Н.С., Чащухина В.А. Феррофации гранитоидов // Геохимия. 1978. № 2. С. 147-160.

Ферштатер Г.Б., Беа Ф. Геохимические особенности уральских гранитоидов, производных разных по составу магм // Геохимия. 1993. № 11. С. 1579-1591.

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

Ферштатер Г.Б., Холоднов В.В., Прибавкин С.В, Бородина Н.С., Бочарникова Т.Д. Рифтогенный магматизм и оруденение Южного Урала // Геология рудных месторождений. 2005. Т. 47. № 5. С. 421-443.

Фоминых В.Г., Дымкин А.М., Попов Б.А., Алешин Б.М. и др. Прогнозная оценка титаномагнетитовых руд Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР,1985. 51 с.

Холоднов В.В., Бушляков И.Н. Галогены в эндогенном рудообразовании. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2002. 394 с.